

Artículo original

Desarrollo de un modelo dinámico mecanicista para predecir el crecimiento de cuyes (*Cavia porcellus*) machos del genotipo Perú

Development of a mechanistic dynamic model to predict the growth of male Perú genotype guinea pigs (*Cavia porcellus*)

William Armando Tapie^{1,*}, Sandra Lucía Posada-Ochoa²,
Jaime Ricardo Rosero-Noguera², Rafael Muñoz-Tamayo³

¹ Grupo de Investigación en Agronomía y Zootecnia-GIAZ, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Católica de Oriente, Rionegro, Colombia

² Grupo de Investigación en Ciencias Agrarias-GRICA, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

³ Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR Modélisation Systémique Appliquée aux Ruminants, 91120, Palaiseau, France

Resumen

Los modelos dinámicos sirven para comprender y predecir el crecimiento y la composición corporal de los animales. El objetivo de nuestro estudio fue desarrollar un modelo dinámico mecanicista para predecir el crecimiento y la composición corporal de cuyes alimentados con una dieta granulada. El modelo integró la dinámica de crecimiento diario en términos de ganancia de peso (GPD), peso corporal vacío (PCV), peso vivo (PV), proteína corporal, grasa, agua y cenizas depositadas, así como los requerimientos de energía (EM_m) y proteína para el mantenimiento (PC_m). El modelo se desarrolló en el programa Scilab. Se utilizaron 21 ecuaciones algebraicas derivadas de un estudio de sacrificio comparativo. El modelo se evaluó utilizando la raíz del error cuadrático medio (RECM), el error relativo de predicción (ERP) y el coeficiente de correlación de concordancia (CCC) de los valores observados en 12 cuyes y los predichos por el modelo. Para el PV, el PCV, el agua, las cenizas, los EM_m y la PC_m el modelo mostró una alta concordancia ($CCC > 0,97$) y un ERP menor al 5 %, lo que indicó que las predicciones eran satisfactorias. Las predicciones de la GPD y la proteína depositada tuvieron concordancias sustanciales (CCC de 0,742 y 0,809, respectivamente), con una predicción satisfactoria para la proteína ($ERP < 20$ %). La predicción de la grasa depositada fue menos acertada ($ERE = 54,93$ y $CCC = 0,031$). El modelo representó satisfactoriamente la dinámica de crecimiento de los cuyes, excepto en la predicción de la grasa depositada.

Palabras clave: Peso vivo; Proteína depositada; Grasa depositada; Requerimientos nutricionales; Energía de mantenimiento; Ganancia de peso.

Abstract

Dynamic models are essential for understanding and predicting animal growth and body composition. Here, we developed a dynamic mechanistic model to predict the growth and body composition in guinea pigs fed a pelleted diet. The model integrated daily growth dynamics in terms of weight gain (WG), empty body weight (EBW), live weight (LW), body protein, fat, water, and ash deposition, as well as energy (ME_m) and protein maintenance (CP_m) requirements. The model was developed using the Scilab software. We derived 21 algebraic equations from a comparative slaughter study and we evaluated the model using the root mean square error (RMSE), the relative prediction error (RPE), and the concordance correlation coefficient (CCC) of the values observed in 12 guinea pigs and those predicted by the model. For LW, EBW, water, ash, ME_m , and CP_m , the model showed a high concordance ($CCC > 0.97$) and an RPE below 5%, indicating satisfactory predictions. WG and body protein deposition predictions had substantial concordance (CCC of 0.742 and 0.809, respectively),

Citación: Tapie WA, *et al.* Desarrollo de un modelo dinámico mecanicista para predecir el crecimiento de cuyes (*Cavia porcellus*) machos del genotipo Perú. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(189):859-870, octubre-diciembre de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2997>

Editor: Martha Patricia Ramírez

***Correspondencia:**

William Armando Tapie;
watapie@unal.edu.co

Recibido: 5 de septiembre de 2024

Aceptado: 6 de noviembre de 2024

Publicado en línea: 29 de noviembre de 2024



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NonCommercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

being satisfactory for the protein (RPE < 20%). Fat deposition prediction was not as satisfactory (RPE = 54.93 and CCC = 0.031). The model adequately represented the growth dynamics of guinea pigs, except for the fat deposition prediction.

Keywords: Live weight; Deposited protein; Deposited fat; Nutritional requirements; Maintenance energy; weight gain.

Introducción

La crianza del cuy es una actividad importante en la economía rural de países como Perú, Ecuador, Colombia y Bolivia, donde está estrechamente vinculada a sus tradiciones y contribuye con la seguridad alimentaria de las comunidades locales (Benavides *et al.*, 2021). En Camerún, República Democrática del Congo, Tanzania y México el cuy también contribuye significativamente a la alimentación y sostenibilidad económica de las poblaciones locales (Ngoula *et al.*, 2017; Ayagirwe *et al.*, 2018; Vargas-Romero *et al.*, 2020).

Con más de 20 millones de cuyes, Perú lidera la producción mundial, con un notable aumento del 20 % en respuesta a la creciente demanda de consumo (MIDAGRI, 2023). Colombia, por su parte, cuenta con una población estimada de aproximadamente 1,5 millones de cuyes (DANE, 2020). La demanda creciente de carne de cuy requiere de animales de mayor tamaño y precocidad, lo cual exige la mejora de los programas de alimentación y cuidado y un mejor conocimiento de los requerimientos y el valor nutricionales de los alimentos (Castro *et al.*, 2022). En los sistemas productivos comerciales se crían animales mejorados genéticamente (tipos Inti, Perú y Andina) para la producción de carne (Avilés *et al.*, 2014), pero se desconocen algunos aspectos relacionados con su crecimiento y nutrición. Entre los requerimientos nutricionales de un animal, las proteínas son el componente fundamental del tejido muscular, además de ciertas hormonas y todas las enzimas (Tapie *et al.*, 2024a), en tanto que la energía se asocia con la ganancia de peso, la madurez sexual, la presencia de estos, la fertilidad y el peso de los gazapos al nacer (Obando, 2013). Son varios los factores que determinan los requerimientos de energía y proteína cruda para mantenimiento; entre los más importantes se puede mencionar el tamaño corporal, que depende de la raza, la edad, el sexo, y la ganancia de peso que está en función de la proporción de grasa y proteína en el tejido depositado y el medio ambiente (Fox & Black, 1984; Xiccato & Trocino, 2020).

Históricamente, los enfoques utilizados para predecir el crecimiento animal se han basado en modelos empíricos y estadísticos que no se fundamentan en principios fisiológicos detallados y que pueden resultar limitados para representar la complejidad de los procesos biológicos involucrados. Frente a esto, en los últimos años ha aumentado considerablemente el interés por aplicar modelos dinámicos mecanicistas en las ciencias animales (Tedeschi, 2022). Estos modelos se basan en principios biológicos y fisiológicos subyacentes y abordan las vías físicas, bioquímicas y metabólicas, entre otras variables, lo que facilita una comprensión más profunda de las interacciones entre los factores internos y externos que influyen en el crecimiento y la composición corporal (Grimm *et al.*, 2016; Anim-Jnr *et al.*, 2020) y constituyen un medio para evaluar el impacto del cambio de dieta en el crecimiento y la composición (Pettigrew, 2016). Además, los modelos híbridos podrían arrojar mejores previsiones e interpretaciones, y permitirían una mayor comprensión de las predicciones, ya que combinan las características conceptuales del modelo mecanicista con el poder predictivo (Tedeschi, 2022). A diferencia de los modelos no lineales empíricos empleados hasta ahora para representar el crecimiento de los cuyes (Noguera *et al.*, 2008; Burgos-Paz *et al.*, 2010; Posada *et al.*, 2015; Vega-Vilca *et al.*, 2023; Tapie *et al.*, 2024b), los modelos dinámicos mecanicistas combinan diferentes técnicas de modelado, como las de los modelos continuos y discretos, para capturar el comportamiento de sistemas complejos. Asimismo, integran elementos deterministas y estocásticos, con el fin de reflejar la naturaleza diversa de un sistema, siendo útiles en campos como la ingeniería, la biología y la economía para representar fenómenos que no

pueden ser descritos por un solo tipo de modelo (**Barton & Lee**, 2002). Así, el desarrollo de un modelo dinámico mecanicista representa un paso adelante en la búsqueda de una aproximación más precisa y holística que prediga el crecimiento y la composición corporal de los cuyes. En este estudio se construyó y se evaluó un modelo dinámico mecanicista específico para cuyes en condiciones de alimentación balanceada, con el objetivo de predecir su crecimiento y la composición corporal.

Metodología

Descripción del modelo

La concepción teórica del modelo requiere las siguientes variables de inicio: peso vivo inicial, consumo de materia seca, contenido de proteína cruda y energía bruta del alimento, las cuales servirán de insumo para calcular el consumo de estos nutrientes. El modelo asume que el peso vivo del animal corresponde a la suma de sus contenidos de proteína, grasa, cenizas y agua. La composición inicial del animal se determinó mediante las ecuaciones propuestas por **Tapie** (2024).

El modelo matemático se basó en el modelo dinámico mecanicista desarrollado para corderos descrito por **Anim-Jnr et al.** (2020). El modelo nos permitió representar la dinámica de crecimiento a través del tiempo en términos de PCV, PV, deposición corporal de proteína, grasa, agua y cenizas, así como los requerimientos de energía y proteína cruda para el mantenimiento.

La descripción de las variables y los valores iniciales utilizados en el desarrollo del modelo se consignan en la **tabla 1**.

Los valores de CMS (g/día) se obtuvieron a lo largo de 84 días de medición en un grupo de 12 animales; el consumo de proteína cruda (CPC, g/día) y el de energía metabolizable (CEM, kcal/día), se calcularon en función del CMS considerando el contenido de proteína cruda (PCa) y la energía metabolizable (EMa) del alimento (Ecuaciones 1 y 2, respectivamente). Estas variables se introdujeron como parámetros de inicio de la simulación. El modelo asume como constantes durante toda la etapa de simulación los coeficientes de eficiencia proteica y energética de una dieta basada en los estándares del National Research Council - NRC (1995) para cuyes de laboratorio, aunque en sistemas comerciales estos factores pueden variar.

$$CPC = CMS_{(g/día)} * PC_{(a)} \quad (1)$$

donde PCa es el contenido de proteína cruda del alimento, que corresponde al 16,36 % en base seca.

$$CEM = CMS * (EBa * EMa), \quad (2)$$

donde es el EBa es el contenido de energía bruta del alimento, que corresponde a 4515 kcal/kg MS y EMa es la metabolibilidad de la energía, que corresponde a 78 %.

El peso corporal vacío inicial se estimó como el 82,21 % del peso vivo (**Tapie**, 2024) empleando la Ecuación 3

$$PCV = 0,8221 * PV_{i(g)} \quad (3)$$

La proteína corporal inicial (PCi), la grasa corporal inicial (Gi), el agua corporal inicial (Wi), y la ceniza corporal inicial (CZi) se calcularon en función del PCVi. Las ecuaciones 4 a 7 se construyeron con los datos derivados del trabajo de **Tapie** (2024).

$$PCi = 0,2056 * PCVi_{(g)} \quad (4)$$

$$Gi = 0,00784 * PCVi_{(g)} \quad (5)$$

$$Wi = 0,7171 * PCVi_{(g)} \quad (6)$$

$$CZi = 0,054 * PCVi_{(g)} \quad (7)$$

Tabla 1. Variables utilizadas en el desarrollo del modelo

| Abreviatura | Unidad | Valor | Definición |
|-------------|------------|---------|--|
| MS | g/100 g | 0,922 | Materia seca del alimento |
| PCa | g/100 g | 0,1635 | Proteína cruda contenida en el alimento |
| CMS | g/día | - | Consumo de materia seca |
| CPC | g/día | - | Consumo de proteína cruda |
| CEM | kcal/día | - | Consumo de energía metabolizable |
| EB | kcal/kg MS | 4515 | Energía bruta del alimento |
| EMa | % | 78 | Metabolicidad de la energía: porción de la energía bruta que se usada como energía metabolizable por el animal |
| PCVi | g/100 g | 0,8221 | Peso corporal vacío inicial: peso vivo del animal menos el contenido del tracto digestivo, la vejiga urinaria y la vesícula biliar |
| PCi | g/100 g | 0,2056 | Proteína cruda inicial, proporción de proteína contenida en el PCVi |
| Gi | g/100 g | 0,00784 | Grasa inicial, proporción de grasa contenida en el PCVi |
| Wi | g/100 g | 0,7171 | Agua inicial, proporción de agua contenida en el PCVi |
| CZi | g/100 g | 0,054 | Ceniza inicial, proporción de cenizas contenida en el PCVi |
| EMm | kcal/día | 149 | Energía metabolizable de mantenimiento por cada kg de PCV metabólico ($PCV^{0,75}$) |
| PCm | g/día | 6,32 | Proteína cruda de mantenimiento por cada kg de PCV metabólico ($PCV^{0,75}$) |
| EMg | kcal/día | - | Energía metabolizable usada para la ganancia de peso por el animal |
| PCg | g/día | - | Proteína cruda usada para la ganancia de peso por el animal |
| PCD | - | 0,629 | Proteína cruda depositada: proporción de la PCg depositada en el cuerpo del animal |
| EM_PCD | kcal/g | - | EM requerida para el depósito de proteínas |
| EM_GD | kcal/g | - | EM disponible para el depósito de grasa |
| GP | g/día | - | Grasa depositada en el cuerpo del animal |

Modelación del crecimiento y la composición corporal

La simulación se realizó con las ecuaciones 8 a 21. Los valores de la proteína cruda de mantenimiento (PC_m) y la energía de mantenimiento (EM_m) se calcularon mediante las ecuaciones 8 y 9 (Tapie, 2024). Los requerimientos de EM_m y PC_m en el modelo se calcularon a partir del PCV metabólico.

$$EM_m = 149_{(kcal/día)} * PCV^{0,75} \quad (8)$$

$$PC_m = 6,32_{(g/día)} * PCV^{0,75} \quad (9)$$

La EM y la PC para la ganancia de peso diario (EM_g y PC_g , respectivamente) se calcularon como la diferencia entre el CEM y el CPC y los requerimientos de mantenimiento (Ecuaciones 10 y 11).

$$EM_g = CEM - EM_m \quad (10)$$

$$PC_g = CPC - PC_m \quad (11)$$

Para calcular la deposición diaria de proteína (PCD), se consideró el valor de la eficiencia en el uso de la proteína cruda por parte del animal (0,629) o el valor máximo de 4 g/día de deposición reportado por **Tapie** (2024), tomando siempre el menor de los dos valores (Ecuación 12) para evitar una sobreestimación de la deposición de proteína.

$$PCD = \min [0,629 * PCg_{(g/día)}; PCD_{max}] \quad (12)$$

El cálculo de la EM requerida para el depósito de proteínas (EM_PCD) (**Tapie**, 2024) se realizó con la Ecuación 13.

$$EM_PCD = 13,571 * PCD - 3 * 10^{-13}; R^2 = 0,999, \quad (13)$$

donde PCD corresponde a los gramos de proteína cruda depositada.

La EM disponible para el depósito de grasa (ME_GD) se calculó a partir de la diferencia entre EM_g y EM_PCD, asumiendo que esta depende de la cantidad de energía después de suplir las necesidades de mantenimiento y el crecimiento, utilizando la Ecuación 14.

$$EM_GD = EM_g - EM_PCD \quad (14)$$

La deposición de grasa (GD) se calculó dividiendo la EM_GP por el costo energético de la deposición de grasa (13.478 kcal/g) (**Tapie**, 2024) mediante la Ecuación 15.

$$GD = (EM_GD/13.478) \quad (15)$$

La proteína corporal y la grasa simuladas en los animales en el primer día (PC_1 y G_1) se calcularon sumando la composición inicial y el depósito de estas fracciones en el día simulado (Ecuaciones 16 y 17). Los valores obtenidos representan la composición inicial para la simulación del día siguiente hasta el día 84.

$$PC1 = (PCi + PCD) \quad (16)$$

$$G1 = (Gi + DG) \quad (17)$$

Con base en los datos de la composición corporal de los animales de referencia y los sacrificados al final del estudio reportado por **Tapie** (2024), se crearon ecuaciones para predecir el agua y las cenizas en el cuerpo del cuy en el día uno (W_1 , CZ_1) a partir de la proteína corporal en el día uno (PC_1) (Ecuaciones 18 y 19).

$$W1 = 3.2577 * PC1 + 0,0165; R^2 = 0,851 \quad (18)$$

$$CZ1 = 0,2293 * PC1 + 0,003; R^2 = 0,856 \quad (19)$$

El PCV simulado en el día uno (PCV_1) se calculó como la suma de los componentes químicos del cuerpo en el día uno según la Ecuación 20, en tanto que el PV simulado de los cuyes en el primer día (PV_1) se obtuvo en función del PCV_1 multiplicado por el coeficiente (1,05) obtenido de los animales sacrificados al final ($PCV/PV = 0,95$) (**Tapie**, 2024) según la Ecuación 21.

$$PCV = PC1 + G1 + W1 + CZ1 \quad (20)$$

$$PV = PCV * 1,05 \quad (21)$$

Evaluación del modelo

La evaluación del modelo se llevó a cabo utilizando los datos de 12 cuyes machos del genotipo Perú alimentados *ad libitum* con una dieta granulada. Los parámetros productivos promedio se presentan en la **tabla 2**.

Tabla 2. Promedios y desviación estándar del rendimiento de cuyes del genotipo Perú (n = 12)

| Variable | Valor observado |
|---|-----------------|
| Peso vivo inicial (g) | 394 ± 55,0 |
| Peso vivo final (g) | 1180 ± 105 |
| Peso corporal vacío final (g) | 1121 ± 103 |
| Ganancia de peso (g/día) | 9,40 ± 1,60 |
| Proteína depositada (g/día) | 2,03 ± 0,33 |
| Grasa depositada (g/día) | 2,04 ± 0,57 |
| Energía metabolizable de mantenimiento (kcal/día) | 127,1 ± 29 |
| Agua (g) | 539,5 ± 141 |
| Cenizas (g) | 38,5 ± 10,6 |
| Proteína cruda de mantenimiento (g/día) | 5,24 ± 1,2 |
| Consumo de materia seca (g/día) | 48,6 ± 6,0 |
| Consumo de proteína cruda (g/día) | 8,0 ± 1,0 |
| Consumo de energía metabolizable (kcal/día) | 168 ± 19 |

Análisis estadístico

El modelo se implementó en el programa de acceso abierto Scilab (<https://www.scilab.org/>), en tanto que el análisis estadístico de la información se hizo con el paquete estadístico R, versión 4.1 (**R Core Team**, 2022). El desempeño del modelo se evaluó empleando los siguientes criterios.

Raíz del error cuadrático medio (RMSE): es una métrica que determina la distancia promedio entre los valores predichos por el modelo y los valores reales en el conjunto de datos, por lo tanto, cuanto menor sea su valor, mejor será el ajuste del modelo (**Rosero-Noguera et al.**, 2022)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}}, \tag{22}$$

donde *n* es el número de observaciones, *O_i* es el *i*-ésimo valor observado y *P_i* es el *i*-ésimo valor predicho por el modelo.

Error relativo de predicción (ERP): se define como el error medio de predicción expresado como porcentaje de la media observada. Un valor de ERP inferior al 10 % es un indicador de predicción satisfactoria y uno superior al 20 % indica una predicción deficiente (**Fuentes-Pila et al.**, 1996)

$$RPE = \left(\frac{RMSE}{\bar{X}} \right) * 100, \tag{23}$$

donde \bar{X} es la media de los valores observados.

Coefficiente de correlación de concordancia (CCC) (Lin, 1989): un valor de CCC de 0,81 a 1,00 indica una predicción casi perfecta, de 0,61 a 0,80 indica una predicción sustancialmente concordante, de 0,41 a 0,60 indica una predicción moderada y valores de 0,21 a 0,40 indican una predicción razonable (**Fuentes-Pila et al.**, 1996; **Visser et al.**, 2012).

$$CCC = \frac{2s_{xy}}{s^2_x + s^2_y + (\bar{x} - \bar{y})^2}, \tag{24}$$

donde \bar{x} y \bar{y} corresponden a la media de los valores observados y predichos, respectivamente, s^2_x y s^2_y a las varianzas de los valores observados y predichos y s_{xy} a la covarianza, la cual se calcula como:

$$s^2_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad s^2_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2, \quad s_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}).$$

Resultados

La **figura 1** muestra la comparación entre los valores simulados por el modelo y los observados en un grupo de 12 animales para el PCV, la ganancia de peso y la proteína, la grasa y las cenizas depositadas, así como el contenido de agua. Durante los primeros siete días, el modelo subestimó la ganancia de peso, prediciendo 3,8 g/día en comparación con el valor observado de 10,5 g/día. Además, la dinámica de las tasas diarias de deposición de grasa no fue modelada con precisión; el modelo subestimó los valores desde el primer día hasta el día 20, en tanto que a partir del día 45, los valores de grasa fueron sobrestimados. En contraste, los patrones de deposición de cenizas, proteína, agua y el PCV simulados mostraron una coherencia adecuada con los valores observados.

Crterios estadísticos del desempeño del modelo

En la **tabla 3** se presentan la RMSE, el RPE y el CCC de la evaluación del modelo de crecimiento y composición corporal de cuyes machos del genotipo Perú. Para el PV final, el PCV, el agua, las cenizas, la EMm y la PCm, el modelo presentó un grado de concordancia casi perfecto (CCC superiores a 0,97), en tanto que los valores simulados por el modelo para las variables antes mencionadas, con excepción del agua, presentaron una desviación menor al 5 % (ERP) respecto a los valores reales, lo que indica una predicción satisfactoria.

La concordancia de la predicción de la ganancia de peso y la proteína depositada fue sustancial (CCC de 0,742 y 0,809, respectivamente). Considerando el ERP, la proteína presentó una predicción satisfactoria (RPE < 20 %), en tanto que para la ganancia de peso fue de 24,27 %, es decir, una predicción deficiente (Fuentes-Pila *et al.*, 1996). Por último, a juzgar por los valores de RPE y CCC para la grasa depositada (54,93 y 0,031, respectivamente), el modelo tuvo dificultades para predecir esta variable de manera coherente.

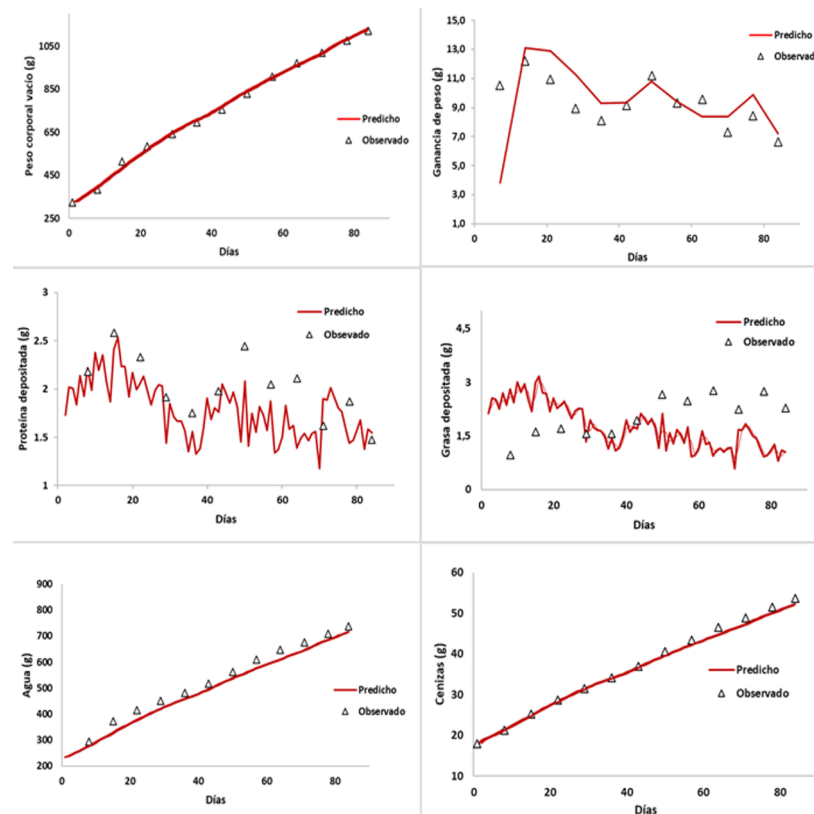


Figura 1. Peso corporal vacío, ganancia de peso, proteína depositada, grasa depositada, cenizas depositadas y contenido de agua en cuyes. Triangulo: valor observado; línea continua: valor predicho

Tabla 3. Indicadores estadísticos del desempeño del modelo para el crecimiento y composición corporal de cuyes machos del genotipo Perú

| Variable | Promedio y desviación estándar | | Indicadores estadísticos | | |
|---|--------------------------------|----------------|--------------------------|-------|-------|
| | Valor observado | Valor predicho | RMSE | ERP | CCC |
| Peso vivo final (g) | 1180 ± 105 | 1190,0 ± 0 | 20,34 | 2,40 | 0,996 |
| Peso corporal vacío final (g) | 1121 ± 103 | 1133,4 ± 0 | 13,68 | 1,72 | 0,998 |
| Ganancia de peso (g/día) | 9,36 ± 1,6 | 9,48 ± 2,5 | 2,172 | 24,27 | 0,742 |
| Proteína depositada (g/día) | 2,03 ± 0,33 | 1,8 ± 0,29 | 0 336 | 16,62 | 0,809 |
| Grasa depositada (g/día) | 2,04 ± 0,57 | 1,76 ± 0,62 | 1 12 | 54,93 | 0,031 |
| Energía metabolizable de mantenimiento (kcal/día) | 127,1 ± 29 | 122,2 ± 29,5 | 2 00 | 1,57 | 0,997 |
| Agua (g) | 539,5 ± 141 | 511,5 ± 142 | 29,10 | 5,39 | 0,977 |
| Cenizas (g) | 38,5 ± 10,6 | 37,8 ± 10,02 | 0,943 | 2,44 | 0,998 |
| Proteína cruda de mantenimiento (g/día) | 5,24 ± 1,2 | 5,1 ± 1,22 | 0,078 | 1,50 | 0,997 |

RMSE: raíz del error cuadrático medio; ERP: error de predicción relativo; CCC: coeficiente de correlación de concordancia

Discusión

Rendimiento general del modelo

El peso de los cuyes en términos de PV y PCV se simuló de manera efectiva como lo indica el alto valor del CCC (>0,99), lo que sugiere que el modelo posee un alto grado de convergencia, ajuste y poder predictivo para estas variables (**Rosero-Noguera et al.**, 2022). El valor de la RMSE demostró que la diferencia media entre los PV y PCV observados y los simulados por el modelo fue de 20,34 y 13,68 g/día, respectivamente. Dichos valores pueden considerarse bajos, ya que según el ERP, que representa la RMSE en términos porcentuales frente al valor medio observado, indican que los valores predichos por el modelo se desviaron de los reales en un 2,40 para el PV y un 1,72 % para el PCV. Según **Fuentes-Pila et al.** (1996), un valor de ERP inferior al 10 % es un indicador de predicción satisfactoria.

El CCC de la GPD fue de 0,742; según **Visser et al.** (2012), este grado de predicción puede interpretarse como sustancial. Para dicho resultado, el valor del ERP indicó una desviación del 24,27 %, valor superior al 20 %, por lo que la predicción del modelo para dicha variable (GPD) se consideraría deficiente (**Fuentes-Pila et al.**, 1996). Cabe aclarar que este resultado podría deberse a que el modelo subestimó la GPD solamente durante los primeros siete días (lo que biológicamente quizás no sea muy relevante), y que a partir de ese momento los valores observados y los predichos fueron coherentes (**Figura 1**), por lo que tales resultados deben interpretarse con precaución. Debe considerarse que factores externos como el ambiente y la genética pueden influir en las predicciones de crecimiento animal. En este estudio nos enfocamos en desarrollar un modelo mecanicista general bajo condiciones controladas. Sin embargo, en futuras aplicaciones el modelo podría adaptarse incorporando parámetros adicionales que reflejen variaciones específicas de genética o manejo en condiciones de campo. Ello permitiría mejorar la precisión y la aplicabilidad del modelo en diversos contextos productivos.

La proteína depositada y la PCm presentaron un CCC de 0,809 y 0,997, respectivamente, es decir, una predicción casi perfecta (**Fuentes-Pila et al.**, 1996). El depósito de proteínas de un animal se considera el factor determinante más importante de la ganancia de peso dado el alto contenido de agua de los tejidos ricos en proteínas (**Tapie**, 2024). Basados en

estos resultados y en el ERP, cuyos valores para las dos fracciones de la proteína simuladas estuvo por debajo del 20 %, puede afirmarse que el modelo presentó una buena capacidad predictiva para estas variables.

Aunque los promedios de deposición de grasa (g/día) observados (2,04) y los predichos (1,76) fueron similares, la dinámica de deposición a través del tiempo no reflejó adecuadamente los patrones biológicos esperados. En estudios previos se encontró que el contenido de músculo fue más bajo y el de grasa más alto en las canales de cuyes de mayor edad que en los más jóvenes (**Sánchez-Macías et al.**, 2018), lo que difiere de las predicciones de nuestro modelo (**Figura 1**). Esta discrepancia podría reducirse si el modelo contara con coeficientes específicos de deposición de grasa para distintas edades, lo cual permitiría simularla con mayor precisión. Sin embargo, debido a la falta de estudios sobre estos coeficientes en cuyes, no fue posible incorporar dicha variabilidad en esta versión del modelo. Actualmente no existen estudios de modelación dinámica en cuyes, pero en otras especies, como los corderos, se ha observado que la simulación de la deposición diaria de grasa también presenta dificultades ($R^2=0,37$; ERP=29,78; CCC=0,34) debido a la inexactitud en la estimación de la composición corporal inicial cuando se utiliza un grupo de sacrificio contemporáneo (**Anim-Jnr et al.**, 2020). Esto se debe en parte a que el tejido graso es altamente sensible a factores como la dieta (**Kouakou et al.**, 2013), la edad y el sexo del animal, los cuales influyen en su variabilidad y dinámica de deposición. Para mejorar la precisión en futuras simulaciones, el modelo podría beneficiarse de ajustes adicionales que contemplen la variabilidad de la composición corporal inicial y parámetros específicos que ajusten las necesidades energéticas y la deposición lipídica en función de la edad y la dieta.

Implicaciones del modelo

Es importante destacar que el modelo puede desviarse de la realidad debido a las simplificaciones inherentes a cualquier modelo de simulación. Estas simplificaciones u omisión de detalles son inevitables e incluso necesarias al modelar un sistema real complejo (**Kobayashi & Salam**, 2000). Por ejemplo, el modelo desarrollado considera la evolución del PCV a través de la deposición de proteína, grasa, agua y cenizas, así como los requerimientos de EMm y PCm y simplifica la estimación de la composición corporal inicial de los animales utilizando las ecuaciones propuestas por **Tapie** (2024), las cuales fueron derivadas de estudios previos. Estas ecuaciones calculan el PCi, la Gi, el Wi y la CZi a partir del PCV estimado, lo que implica que cualquier variabilidad individual no capturada por estas ecuaciones es ignorada.

Además, se asumió que el contenido de PC y EM del alimento era constante durante todo el periodo de simulación, lo cual representa una simplificación significativa en comparación con las posibles fluctuaciones en la calidad del alimento que podrían ocurrir en un entorno real. La eficiencia en el uso de la proteína cruda, fijada en 0,629, se utilizó para calcular la deposición diaria de proteína, lo que implica que tanto la eficiencia como la capacidad de deposición se consideraron constantes, a pesar de que en la realidad pueden variar según la etapa de crecimiento del animal. Asimismo, las ecuaciones que predicen el contenido de agua y cenizas corporales a partir de la proteína corporal se construyeron utilizando relaciones lineales (Ecuaciones 18 y 19), lo que impediría capturar con precisión las interacciones más complejas presentes en la realidad. Por último, el modelo asumió que el PCV era la suma de sus componentes químicos (proteína, grasa, agua y cenizas) y que el PV era una función directa del PCV multiplicado por un coeficiente constante (1,05). Esta simplificación podría no reflejar adecuadamente las fluctuaciones diarias en la composición corporal que pueden ocurrir en condiciones reales. Por lo tanto, la pregunta relevante no es si el modelo es correcto o incorrecto, sino cuánto difiere la salida del modelo de la medición real y por qué. Según **Tedeschi** (2022), el rendimiento del modelo sólo puede discutirse en términos relativos, no absolutos.

No obstante, según **Hurtado et al.** (2021), la modelación matemática del crecimiento y la información sobre el consumo de alimento son los medios principales para desarrollar programas de nutrición de precisión. Desde este punto de vista, los resultados obtenidos

mediante el modelo propuesto resultan relevantes, ya que en Colombia la cría del cuy representa una alternativa económica y social, por lo que conocer el rendimiento productivo de la especie es de gran interés, sobre todo el de los cuyes del tipo Perú, que son los utilizados comúnmente para la producción de carne debido a su precocidad, rápido crecimiento y alto rendimiento (Dalle-Zotte & Cullere, 2019). Como ya se mencionó, el crecimiento animal es uno de los aspectos más importantes al evaluar la productividad en las explotaciones dedicadas a la producción de carne, por lo que el conocimiento de las características asociadas a él con el enfoque que proponemos permitirá orientar los programas de nutrición, alimentación y selección genética, buscando mejorar los índices productivos y el uso eficiente de los recursos alimenticios.

Conclusiones

La simulación del rendimiento con el modelo de crecimiento desarrollado para cuyes se caracterizó por su exactitud. Aunque la simulación de la deposición de grasa fue deficiente, la precisión de las demás variables evaluadas justifica su modelación y aplicación. En general, estos resultados ofrecen evidencia de que un modelo dinámico mecanicista podría usarse para evaluar el crecimiento y la composición en canal de cuyes del genotipo Perú.

Información suplementaria

Ver la información suplementaria en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2997/4478>

Agradecimientos

A la Fundación CEIBA, a la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad de Antioquia por el apoyo financiero y a la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Católica de Oriente.

Contribución de los autores

WAT, SLP, RR y RMT: conceptualización, curación de datos, análisis formal, metodología, redacción, revisión y edición; WAT, SLP y RR: adquisición de la financiación; WAT: investigación, administración de proyectos; SLP, RR y RMT: supervisión y validación.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Anim-Jnr, S., Morel, P.C.H., Kenyon, P. R., Blair, H. T. (2020). A mechanistic dynamic simulation model of nutrient utilization, growth and body composition in pre-weaned lambs reared artificially. *Animal Feed Science and Technology*, 261, 114402. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114402>
- Ayagirwe, R.B., Meutchieye, F., Manjeli, Y., Maass, B. L. (2018). Production systems, phenotypic and genetic diversity, and performance of cavy reared in sub-Saharan Africa: a review. *Livestock Research for Rural Development*, 30(6), 1-12. <http://www.lrrd.org/lrrd30/6/ayagi30105.html>
- Avilés, D., Martínez, A., Landi, V., Delgado, J. (2014). The guinea pig (*Cavia porcellus*): An Andean resource of interest as an agricultural food source. *Animal Genetic Resources/ Ressources Génétiques Animales/Recursos Genéticos Animales*, 55, 87-91. <https://doi.org/10.1017/S2078633614000368>
- Barton, P.I. & Lee, C.H. (2002). Modeling, simulation, sensitivity analysis, and optimization of hybrid systems. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS)*, 12(4), 256-289. <https://doi.org/10.1145/643120.643122>
- Benavides, B., Cisneros-López, H.D., Peláez-Sánchez, R. G. (2021). Evidencia molecular de *Leptospira interrogans* sensu stricto en *Cavia porcellus* (cuyes) destinados para el consumo humano en el municipio de Pasto, Nariño. *Universidad y Salud*, 24(1), 55-64. <https://doi.org/10.22267/rus.222401.258>

- Burgos-Paz, W., Solarte-Portilla, C., Cerón-Muñoz, M. (2010).** Efecto del tamaño de camada y número de parto en el crecimiento de cuyes (*Cavia porcellus* Rodentia: caviidae). *Revista Lasallista de Investigación*, 7(2), 47-55. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69519014007>
- Castro, B.J., Chirinos, P.D., Quijada-Caro, E. (2022).** Digestible and metabolizable energy prediction models in guinea pig feedstuffs. *Journal of Applied Animal Research*, 50(1), 355-362. <https://doi.org/10.1080/09712119.2022.2079647>
- Departamento Administrativo Nacional De Estadística – DANE. (2020).** *Resultados encuesta nacional agropecuaria – ENA*. <https://www.dane.gov.co/>
- Dalle-Zotte, A. & Cullere, M. (2019).** Carcass Traits and Meat Quality of Rabbit, Hare, Guinea Pig and Capybara. In J. Lorenzo, P. Munekata, F. Barba, F. Toldrá (Eds.) *More than Beef, Pork and Chicken – The Production, Processing, and Quality Traits of Other Sources of Meat for Human Diet*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05484-7_7
- Fox, D.G. & Black, J.R. (1984).** A system for predicting body composition and performance of growing cattle. *Journal of Animal Science*, 58(3), 725-739. <https://doi.org/10.2527/jas1984.583725x>
- Fuentes-Pila, J., DeLorenzo, M.A., Beede, D.K., Staples, C.R., Holter, J.B. (1996).** Evaluation of equations based on animal factors to predict intake of lactating Holstein cows. *Journal of Dairy Science*, 79(9), 1562-1571. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(96\)76518-9](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(96)76518-9)
- Grimm, K. J., Ram, N., Estabrook, R. (2016).** *Growth modeling: Structural equation and multilevel modeling approaches*. The Guilford Press.
- Hurtado, E. A., Cueva-Navia, T., Barba-Capote, C. (2021).** La modelización del crecimiento de los cerdos bajo un sistema de cama profunda. *Ciencia Unemi*, 14(36), 1-11. <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol14iss36.2021pp1-11p>
- Kobayashi, K. & Salam, M. U. (2000).** Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components. *Agronomy Journal*, 92(2), 345-352. <https://doi.org/10.2134/agronj2000.922345x>
- Kouakou, N.D., Grongnet, J.F., Assidjo, N.E., Thys, E., Marnet, P.G., Catheline, D., Legrand, P., Kouba, M. (2013).** Effect of a supplementation of *Euphorbia heterophylla* on nutritional meat quality of Guinea pig (*Cavia porcellus* L.). *Meat Science*, 93(4), 821-826. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.11.036>
- Lin, L.I. (1989).** A Concordance Correlation Coefficient to Evaluate Reproducibility. *Biometrics*, 45(1), 255-268. <https://doi.org/10.2307/2532051>
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego-MIDAGRI. (2023).** Plataforma digital única del Estado Peruano. *Razas de cuyes del INIA incrementan en 20 % productividad de la crianza familiar y consumo de su carne*. <https://www.gob.pe/>
- Ngoula, F., Tekam, M.G., Kenfack, A., Tchingo, C.D.A.T., Nouboudem, S., Ngoumtsop, H., Tchoumboue, J. (2017).** Effects of heat stress on some reproductive parameters of male cavie (*Cavia porcellus*) and mitigation strategies using guava (*Psidium guajava*) leaves essential oil. *Journal of Thermal Biology*, 100(64), 67-72. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2017.01.001>
- Noguera, R., Pereira, R.L., Solarte, C.E. (2008).** Comparación de modelos no lineales para describir curvas de crecimiento en cuyes (*Cavia porcellus*) desde el nacimiento hasta la edad de sacrificio. *Livestock Research for Rural Development*, 20(79), 1-9. <http://www.lrrd.org/lrrd20/5/nogu20079.htm>
- Obando, L. (2013).** Determinación de perfiles metabólicos en fase de levante y ceba de Cuyes (*Cavia porcellus*), bajo diferentes tipos de dietas. [Tesis para optar el título de Magister en ciencias agrarias], Facultad de Ciencias Pecuarias. Universidad de Nariño. <http://biblioteca.udenar.edu.co:8085/atenea/biblio>.
- Pettigrew, J.E. (2016).** Essential role for simulation models in animal research and application. *Animal Production Science*, 58(4), 704-708. <https://doi.org/10.1071/AN15794>
- Posada, S. L., Solarte, C.E., Noguera, R.R. (2015).** Efecto de la línea genética y el sexo sobre el crecimiento en cuyes (*Cavia porcellus*). *Livestock Research for Rural Development*, 27(1). <http://www.lrrd.org/lrrd27/1/posa27001.htm>
- R Core Team. (2022).** *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Rosero-Noguera, R., Bedoya-Mazo, S., Posada-Ochoa, S.L. (2022).** Predicción del consumo de materia seca de forraje en vacas lecheras mediante el uso de acelerómetros. *Información Tecnológica*, 33(4), 63-72. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642022000400063>

- Sánchez-Macías, D., Barba-Maggi, L., Morales-delaNuez, A., Palmay-Paredes, J.** (2018). Guinea pig for meat production: a systematic review of factors affecting the production, carcass and meat quality. *Meat Science*, 143, 165-176. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.05.004>
- Tapie, W.A.** (2024). Estimación de requerimientos de energía y proteína cruda en cuyes (*Cavia porcellus*) machos enteros de la línea Perú. [Tesis para optar el título de Doctorado en ciencias animales], Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad de Antioquia. <https://hdl.handle.net/10495/40372>
- Tapie, W.A., Posada Ochoa, S.L., Rosero-Noguera, R.** (2024a). A theoretical approach to energy requirements in guinea pigs (*Cavia porcellus*). *Agronomía Mesoamericana*, 35, 57058. <https://doi.org/10.15517/am.2024.57058>
- Tapie, W.A., Giraldo, L., Posada-Ochoa, S., Rosero-Noguera, J.R.** (2024b). Growth curves of male guinea pigs (*Cavia porcellus*) of the Peruvian breed through non-linear models in Colombia. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 27(1), 1-10. <https://doi.org/10.56369/tsaes.5179>
- Tedeschi, L.O.** (2022). ASAS-NANP Symposium: Mathematical Modeling in Animal Nutrition: The progression of data analytics and artificial intelligence in support of sustainable development in animal science. *Journal of Animal Science*, 100(6), skac111. <https://doi.org/10.1093/jas/skac111>
- Vargas-Romero, J., Losada-Custardoy, H., Cortés-Zorrilla, J., Alemán-López, V., Vieyra-Durán, J., Luna-Rodríguez, L.** (2020). Propuesta gastronómica con *Cavia porcellus*. *Abanico veterinario*, 10(1), 1-12. <https://doi.org/10.21929/abavet2020.31>
- Vega-Vilca, J.F., Maguiña-Maza, R.M., Cipriano Bautista, J.G., Vega-Cadillo, C.A.** (2023). Modelos no lineales para la descripción del crecimiento de cuyes (*Cavia porcellus*) de saca temprana. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 34(4), e24409. <https://doi.org/10.15381/rivep.v34i4.24409>
- Visser, A., López-Villalobos, N., Morel, P.C.H.** (2012). Validation of a bio-economic dairy production model. In Proceedings of the New Zealand Society of Animal Production. *New Zealand Society of Animal Production*, 72, 139-143. <http://www.nzsap.org/.../ab12030.pdf>
- Xiccato, G. & Trocino, A.** (2020) Energy and Protein Metabolism and Requirements. In C. De Blas y J. Wisewan. (Ed), Nutrition of the Rabbit. 3rd Edition (41-57). CAB International, Wallingford, UK. <https://www.cabi.org/bookshop/book/9781789241273/>