



Fracturabilidad y morfología del fémur de pollos de engorde como determinantes de la luminosidad¹

Joyce Carazo-Chantón², Catalina Salas-Durán³, Alejandro Chacón-Villalobos⁴

RESUMEN

La presente investigación, realizada en Costa Rica entre enero y diciembre de 2015, estudió la relación entre la luminosidad del fémur de pollos de engorde (L*) y su grosor, longitud y fuerza de quiebre. En total, fueron muestreados 651 fémures en una planta de faenado avícola en Siquiara de Alajuela, provenientes de 10 granjas. Las mediciones de luminosidad se efectuaron al finalizar el proceso de "chiller", y posteriormente al descarnado, empleando un colorímetro Minolta; se midió el grosor (mm) y la longitud (mm) con un escalímetro digital. Los fémures se trasladaron seguidamente al LANAMME de la Universidad de Costa Rica, donde se midió la fuerza de quiebre (kgf) utilizando una compresora Universal MTS Landmark. Los resultados obtenidos se analizaron empleando ANOVA de Welch, intervalos de confianza (95%), correlaciones de Spearman, regresión lineal múltiple robusta y análisis de componentes principales (PCA). El ANOVA de Welch mostró diferencias significativas en la media de L entre

¹ Este trabajo formó parte del proyecto de investigación 737-B4-125. Efecto de la suplementación de dietas de pollos con 25 OH-colecalciferol sobre la incidencia del síndrome de hueso negro y las características sensoriales e instrumentales asociadas a este defecto.

² Colegio de Ingenieros Agrónomos. Moravia. San José. joycecarazo@gmail.com. Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1568-8664>

³ Universidad de Costa Rica. Escuela de Zootecnia. San Pedro. San José. catalina.salas@ucr.ac.cr. Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5627-6346>

⁴ Universidad de Costa Rica. Escuela de Zootecnia. Estación Experimental Alfredo Volio Mata. La Unión. Cartago. alejandro.chacon@ucr.ac.cr. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8454-9505>

Recibido: 12 noviembre, 2026 Aceptado: 12 agosto, 2026



algunas granjas ($p < 0,05$); no obstante, en todas ellas los valores medios se mantuvieron dentro de la categoría aceptable según la escala DSM® ($L^* > 40$). En todas las granjas, al menos un 93% de los huesos mostraron luminosidad aceptable (límite inferior de IC 95% $\geq 0,93$). Las correlaciones de Spearman resultaron significativas entre L^* y las demás variables evaluadas ($p < 0,05$). La modelación de regresión lineal explicó el 17,1% de la variabilidad en L^* ($R^2=0,171$, $p < 0,001$), siendo la fuerza de quiebre el predictor con más impacto. El análisis PCA ($KMO=0,753$; Bartlett $p < 0,001$) extrajo un único componente principal ($\lambda_1=2,270$), que explicó un 56,76% del total de la varianza y con alta saturación de las variables en general ($\geq 0,60$). Se concluye que los fémures con mayor luminosidad posterior a la cosecha de las aves se asocian con los parámetros propios de una mejor integridad ósea.

Palabras clave: industria cárnica, avicultura, procesamiento avícola, integridad ósea, hueso negro.

ABSTRACT

Fracturability and morphology of broiler chicken femurs as determinants of luminosity. The present study, conducted in Costa Rica from January to December 2015, investigated the relationship between femur luminosity (L^*) in broiler chickens and femur thickness, length, and breaking strength. A total of 651 femurs were sampled at a poultry processing plant in Siquiara, Alajuela, originating from 10 poultry farms. Luminosity measurements were performed at the end of the chilling process and, subsequently, after deboning using a Minolta colorimeter. Thickness (mm) and length (mm) were measured using a digital caliper. The femurs were subsequently transported to LANAMME at the University of Costa Rica, where breaking strength (kgf) was measured using an MTS Landmark universal testing machine. The results were analyzed using Welch's ANOVA, 95% confidence intervals, Spearman's correlations, robust multiple linear regression, and principal component analysis (PCA). Welch's ANOVA showed significant differences in mean L^* among some farms ($p < 0.05$); however, mean values

for all farms remained within the acceptable category according to the DSM® scale ($L^* > 40$). In all farms, at least 93% of the bones exhibited acceptable luminosity (lower limit of the 95% CI ≥ 0.93). Spearman's correlations were significant between L^* and the other variables evaluated ($p < 0.05$). The linear regression model explained 17.1% of the variability in L^* ($R^2 = 0.171$, $p < 0.001$), with breaking strength being the most influential predictor. Principal component analysis (KMO = 0.753; Bartlett's test, $p < 0.001$) extracted a single principal component ($\lambda_1 = 2.270$), which explained 56.76% of the total variance, with generally high variable loadings (≥ 0.60). It is concluded that femurs with greater post-processing luminosity are associated with parameters indicative of better bone integrity.

Keywords: meat industry, poultry farming, poultry processing, bone integrity, black bone.

INTRODUCCIÓN

La industria avícola moderna ha experimentado en las últimas décadas un incremento acelerado, donde, gracias a las prácticas de manejo y a los avances en procesos de selección genética, se producen aves con un rápido desarrollo que reduce el tiempo de salida al mercado de estos animales (Uculmana-Morales, 2015; Jarama-Peñaloza, 2016). No obstante, esta reducción en el tiempo de cosecha se ha asociado con la aparición de trastornos en el desarrollo y formación del sistema óseo de aves, tales como el raquitismo, la necrosis de la cabeza del fémur, la discondroplasia de la tibia y el síndrome de hueso negro (SHN) (Riber y Wurtz, 2024). La presencia de estos trastornos puede generar pérdidas económicas asociadas con la mortalidad y la reducción del rendimiento, además de afectar la percepción del consumidor sobre la calidad del producto (Riber y Wurtz, 2024).

Para comprender la aparición de estos trastornos y su relación con la calidad del producto, debe considerarse que la integridad ósea es una cualidad multifactorial, derivada de interacciones complejas entre la genética, el manejo nutricional, aspectos sanitarios y de salud intestinal, la densidad de población y el sistema de alojamiento. Si el desarrollo de los huesos no coincide con el crecimiento de los animales, puede darse una pobre osificación intramembranosa, una mineralización deficiente y una estructura cortical porosa. Estas alteraciones pueden favorecer la migración de sangre y pigmentos de los huesos hacia la carne, lo cual se ve aún más potenciado durante procesos como la cocción y el congelamiento (Lu et al., 2025; de Melo et al., 2020). Esto provoca un oscurecimiento del hueso y de la carne adyacente después del sacrificio y procesamiento de pollos de engorde (Aingla, 2015). Este defecto se atribuye a la oxidación de la hemoglobina, y aunque no se asocia con sabores residuales ni con un riesgo para la inocuidad, puede generar una menor aceptación del producto final en parte de los consumidores.

El color es uno de los principales indicadores de calidad según la percepción del consumidor, ya que es una característica evidente al momento de la compra, pudiendo relacionar las partes oscuras con deterioro, lo que podría llevar a un rechazo del producto (de Melo et al., 2020). De acuerdo con Baldo et al. (2013), hasta el 30% de los huesos de muslo presentan algún grado de oscurecimiento en la carne adyacente, lo cual ha afectado a la industria avícola. A nivel industrial, en Costa Rica no existe un control basado en indicadores sobre la presencia de oscurecimiento.

En la industria alimentaria, el sistema colorimétrico CIELAB es ampliamente utilizado debido a su capacidad para cuantificar el color de manera objetiva y reproducible. Dentro de este sistema, el parámetro luminosidad (L^*) es particularmente relevante para analizar huesos de pollos de engorde, ya que representa la claridad u oscuridad de una muestra (donde: $L^*=0$ es negro puro, y $L^*=100$, es blanco difuso) (Baldo et al., 2013). Este parámetro se utiliza en la generación de escalas de aceptabilidad, como es el caso de la escala DSM® para la evaluación de la calidad de los fémures de pollos de engorde (Salas, 2018). Estudiar una posible interrelación entre las propiedades ópticas (luminosidad), morfológicas (grosor, longitud) y

mecánicas (fuerza de quiebre) del hueso puede generar elementos de utilidad práctica que lleven a entender mejor la multidimensionalidad del fenómeno del oscurecimiento.

El presente trabajo tuvo como objetivo estudiar la relación entre la luminosidad superficial del fémur y sus propiedades morfológicas (grosor y longitud) y mecánicas (fuerza de quiebre) en pollos de engorde criados en condiciones comerciales diversas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del estudio

El presente estudio se realizó entre enero y diciembre de 2015 en Costa Rica. Durante 12 semanas de ese periodo, se muestrearon fémures en una planta de faenado y procesamiento avícola ubicada en Siquiara de Alajuela, que recibía aves provenientes de 10 granjas avícolas. Por asuntos de confidencialidad, dada la naturaleza del estudio, no se consignan los nombres de las granjas ni la línea específica de ave de cada una de ellas. No obstante, este estudio solo involucró aves de las líneas Ross 308 y Cobb 500, con una edad promedio de cosecha de 40 días. En sus granjas de origen, las aves fueron manejadas en un sistema de alojamiento en piso de cemento con granza de arroz como cama, y con una densidad media de 15 aves/m². En esta planta, después del enfriamiento en "chiller" y del descarnado manual, se midió la luminosidad inicial (L) directamente sobre cada fémur.

Las mediciones morfológicas y las pruebas de fractura se realizaron en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME), localizado en la sede Rodrigo Facio de la Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, provincia de San José.

Recolección y evaluación de las muestras

Se muestreó aleatoriamente un total de 651 fémures de pollo de engorde en la línea de producción de la planta de faena, posterior al sistema de enfriamiento tipo “chiller”. La L^* de cada uno de los fémures fue medida sobre el hueso (Aingla, 2015), con un colorímetro Konica Minolta CR-400 según el sistema de color CIELAB. Para la interpretación de los resultados, se empleó la escala de aceptabilidad diseñada por la empresa DSM® (Herrera et al., 2015; Salas, 2018), la cual clasifica los valores de L^* . Dicha escala cataloga los valores de luminosidad del hueso fémur en tres categorías: aceptables (valores de L^* mayores a 40), casi inaceptables (valores de L^* entre 40 y 35) e inaceptables (valores de L^* menores a 35).

Posteriormente, las muestras se trasladaron al LANAMME, donde se midieron la longitud y el grosor de cada fémur, en milímetros, mediante un calibrador digital (pie de rey). La longitud se determinó entre los extremos del hueso, mientras que el grosor se midió transversalmente en su parte más angosta. La fuerza de quiebre se determinó en kilogramos-fuerza (kgf) mediante una prueba de flexión aplicada en la región central del fémur, utilizando una máquina universal MTS Landmark con una capacidad máxima de 2,5 toneladas-fuerza, como se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Colocación de los huesos en la compresora Universal MTS Landmark.

Análisis estadístico

Los análisis estadísticos se desarrollaron en cinco etapas. Inicialmente, con la intención de establecer si existieron diferencias significativas en las medias de L^* entre granjas, y tras comprobar según las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene la falta de normalidad y la presencia de heterocedasticidad, se aplicó un ANOVA de Welch robusto con comparaciones post hoc Games–Howell al 95% (Delacre et al., 2019). Se empleó el siguiente modelo:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = es la variable respuesta

μ = es la media general

τ_i = es el efecto fijo asociado a la granja de procedencia

ε_{ij} = es el error aleatorio experimental

En una segunda etapa, las observaciones se clasificaron comparativamente según granjas en “aceptables” ($L^* > 40$), “casi inaceptables” ($35 \leq L^* \leq 40$) e “inaceptables” ($L^* < 35$). Para cada categoría se calcularon las proporciones observadas ($p=k/n$, donde k es el número de casos, n el tamaño de muestra por granja, y p las proporciones observadas) y sus intervalos de confianza exactos al 95% mediante el método de Clopper–Pearson usando la distribución binomial exacta (Habtzghi et al., 2014). Establecido el hecho de que todas las granjas mostraron al menos un 93% de huesos aceptables (límite inferior de IC 95% $\geq 0,93$) y las diferencias en proporciones fueron insignificantes desde el punto de vista práctico, se prosiguió analizando las variables colorimétricas y morfológicas sin considerar el factor de procedencia.

Posteriormente, se exploraron las asociaciones entre L^* , longitud, grosor y fuerza de quiebre mediante correlaciones de Spearman acompañadas de suavizado LOESS para visualizar posibles tendencias monotónicas entre las variables pareadas (Rymarz et al., 2022). Para cuantificar el aporte de la longitud, el grosor y la fuerza de quiebre en la predicción de L^* se ajustó un modelo de regresión lineal múltiple robusta con bootstrap (1000 réplicas), considerando L^* como variable dependiente (Riani et al., 2023).

Finalmente, se estudió la variabilidad conjunta de L^* , longitud, grosor y fuerza de quiebre mediante un análisis de componentes principales (PCA) sobre las cuatro variables estandarizadas (z-scores) con rotación VARIMAX (Jolliffe y Cadima, 2016). En todos los casos se utilizó el software SPSS, versión 27 (IBM Corporation, 2017).

RESULTADOS

Diferencias entre el parámetro colorimétrico L^* y otras variables morfológicas según granjas

Al evaluar la variable L^* , en términos de la prueba de Shapiro-Wilk, cuatro de las diez granjas presentaron valores de $p < 0,05$. Aunque las demás granjas presentaron valores de $p > 0,05$, se consideró que, para efectos de la prueba, el supuesto global de normalidad se encontraba comprometido. La prueba de Levene confirmó una heterocedasticidad significativa [$F(9,639) = 4,979$; $p < 0,001$].

La situación antes descrita se repitió para la variable fuerza de quiebre [Shapiro-Wilk $p < 0,05$ en cuatro granjas; Levene $F(9,639) = 5,578$, $p < 0,001$] y grosor del fémur [Shapiro-Wilk $p < 0,05$ en tres granjas; Levene $F(9,640) = 5,347$, $p < 0,001$]. Para la variable longitud del fémur, la prueba de Shapiro-Wilk estimó valores de $p > 0,05$ para todas las granjas, no obstante, la prueba de Levene [$F(9,639) = 4,506$, $p < 0,001$] evidenció heterocedasticidad.

En el Cuadro 1 se resumen los resultados de las diferencias de medias para las variables de estudio.

Cuadro 1. Valores medios y desviación estándar de los parámetros morfológicos, mecánicos y colorimétricos de los fémures de pollos de engorde según granja de procedencia.

Granja	Variable evaluada							
	Luminosidad (L*)		Longitud (mm)		Grosor (mm)		Fuerza (kgf)	
	Valor	D.E	Valor	D.E	Valor	D.E	Valor	D.E
1	50,46 ^c	4,86	68,78 ^e	3,35	7,61 ^d	0,83	21,82 ^c	5,06
2	54,04 ^a	3,56	72,24	3,42 ^c	8,76 ^b	1,17	26,28 ^b	4,94
3	52,78 ^b	2,25	72,84 ^c	3,54	8,08 ^c	0,99	28,61 ^b	5,89
4	52,96 ^b	2,80	71,69 ^c	2,67	7,98 ^c	0,89	23,43 ^c	4,87
5	50,53 ^c	3,51	67,07 ^f	3,01	7,59 ^d	0,79	19,40 ^d	3,42
6	54,53 ^a	2,52	73,35 ^c	3,19	8,83 ^b	1,22	25,77 ^b	7,07
7	54,97 ^a	3,70	74,42 ^b	2,43	9,26 ^a	1,07	30,33 ^a	4,40
8	53,88 ^a	2,92	69,69 ^d	1,74	8,62 ^b	0,79	23,60 ^c	3,00
9	54,94 ^a	2,51	77,19 ^a	2,35	9,34 ^a	0,97	30,37 ^a	4,70
10	53,88 ^a	3,24	73,37 ^c	2,69	8,84 ^b	0,77	25,37 ^b	5,59
F _w	16,4		82,2		34,0		49,3	
ε ²	0,19		0,48		0,30		0,33	

Letras superíndices diferentes en una misma columna indican diferencias entre medias ($p < 0,05$). D.E: desviación estándar; ϵ^2 : tamaño del efecto robusto; F_w: estadístico de Welch.

Intervalo de confianza para las proporciones de huesos "aceptables", "casi inaceptables" e "inaceptables"

Como se muestra en el Cuadro 2, la proporción observada de fémures con luminosidad aceptable ($L^* > 40$) estuvo entre 0,98 y 1,00. Ocho de las diez granjas presentaron 100% de muestras en el rango aceptable, mientras que las granjas 1 y 10 alcanzaron 98%. Como un todo, la frecuencia de muestras clasificadas como casi inaceptables o inaceptables no superó el 2% en ninguna granja.

Cuadro 2. Proporción de fémures según categoría de luminosidad por granja.

Granja	n	Aceptable		Casi inaceptables		Inaceptables	
		k/n	[LI, LS]	k/n	[LI, LS]	k/n	[LI, LS]
1	100	98/100 (0,98)	[0,93, 1,00]	1/100 (0,01)	[0,00, 0,05]	1/100 (0,01)	[0,00, 0,05]
2	100	100/100 (1,00)	[0,96, 1,00]	0/100 (0,00)	[0,00, 0,04]	0/100 (0,00)	[0,00, 0,04]
3	100	100/100 (1,00)	[0,96, 1,00]	0/100 (0,00)	[0,00, 0,04]	0/100 (0,00)	[0,00, 0,04]
4	50	50/50 (1,00)	[0,93, 1,00]	0/50 (0,00)	[0,00, 0,07]	0/50 (0,00)	[0,00, 0,07]
5	50	50/50 (1,00)	[0,93, 1,00]	0/50 (0,00)	[0,00, 0,07]	0/50 (0,00)	[0,00, 0,07]
6	50	50/50 (1,00)	[0,93, 1,00]	0/50 (0,00)	[0,00, 0,07]	0/50 (0,00)	[0,00, 0,07]
7	50	50/50 (1,00)	[0,93, 1,00]	0/50 (0,00)	[0,00, 0,07]	0/50 (0,00)	[0,00, 0,07]
8	50	50/50 (1,00)	[0,93, 1,00]	0/50 (0,00)	[0,00, 0,07]	0/50 (0,00)	[0,00, 0,07]
9	50	50/50 (1,00)	[0,93, 1,00]	0/50 (0,00)	[0,00, 0,07]	0/50 (0,00)	[0,00, 0,07]
10	50	49/50 (0,98)	[0,89, 1,00]	0/50 (0,00)	[0,00, 0,07]	1/50 (0,02)	[0,00, 0,11]

k=número de casos, n=tamaño de muestra por granja. LI= límite inferior. LS=límite superior. Intervalo de confianza al 95%

Matriz de correlaciones de Spearman para las variables evaluadas

El Cuadro 3 resume los resultados obtenidos para el análisis de correlación, los cuales indican que las variables morfológicas del fémur (longitud y grosor) presentan asociaciones más fuertes con la fuerza de quiebre que la luminosidad (L*).

Cuadro 3. Correlaciones de Spearman entre las variables evaluadas en los fémures de pollos de engorde.

Pareja de variables	Media V1 ± D.E	Media V2 ± D.E	p de Spearman
Longitud – Fuerza	71,44 ± 4,13 mm	24,81 ± 6,02 kgf	0,563
Grosor – Fuerza	8,38 ± 1,14 mm	24,81 ± 6,02 kgf	0,468
Longitud – Grosor	71,44 ± 4,13 mm	8,38 ± 1,14 mm	0,522
Luminosidad – Fuerza	52,92 ± 3,85	24,81 ± 6,02 kgf	0,386
Luminosidad – Longitud	52,92 ± 3,85	71,44 ± 4,13 mm	0,372
Luminosidad – Grosor	52,92 ± 3,85	8,38 ± 1,14 mm	0,346

V1: Primer valor de la pareja; V2: Segundo valor de la pareja; D.E: desviación estándar. p < 0,001 en todos los casos.

Modelo de regresión lineal múltiple para evaluar el aporte de las variables en la predicción de la L^*

El modelo mostró apropiado ajuste [$F(3,643) = 44,14$; $p < 0,001$], con un valor de $R = 0,413$; $R^2 = 0,171$ y R^2 ajustado de 0,167. El error estándar de la estimación fue de 3,516. En el Cuadro 4 se muestran los detalles en cuanto a coeficientes obtenidos para el modelo de regresión.

Cuadro 4. Coeficientes de regresión, colinealidad e intervalos de confianza Bootstrap BCa (95%) del modelo de regresión lineal múltiple para la predicción de la luminosidad (L^*).

Predictor	B	SE B	β	t	p	95% BCa CI	Tolerancia	VIF
Constante	35,101	2,547	—	13,782	$< 0,001$	[29,494, 40,781]	—	—
Longitud de Hueso	0,149	0,043	0,160	3,501	$< 0,001$	[0,062, 0,242]	0,617	1,621
Grosor de Hueso	0,462	0,145	0,137	3,179	0,002	[0,209, 0,727]	0,697	1,436
Fuerza de Quiebre	0,133	0,028	0,207	4,694	$< 0,001$	[0,082, 0,185]	0,665	1,503

B: Coeficiente de regresión no estandarizado. SE B: Error Estándar de B. β : Coeficiente de regresión estandarizado. t: Estadístico t. p: Probabilidad. BCa CI: Intervalo de Confianza Corregido por Sesgo y Acelerado. VIF: Factor de inflación de la varianza.

Los valores de tolerancia, comprendidos entre 0,617 y 0,697; y los factores de inflación de la varianza, entre 1,436 y 1,621, no sugirieron colinealidad problemática entre los predictores. Los tres predictores fueron estadísticamente significativos. La fuerza de quiebre presentó el mayor coeficiente estandarizado ($\beta = 0,207$; $p < 0,001$), seguida de la longitud del hueso ($\beta = 0,160$; $p < 0,001$) y del grosor del hueso ($\beta = 0,137$; $p = 0,002$). El modelo explicó el 17,1% de la variabilidad observada en L^* . Las correlaciones semiparciales fueron de baja magnitud, entre 0,114 y 0,169, lo que es consistente con contribuciones únicas modestas de los predictores. Las correlaciones parciales también fueron de baja magnitud, con valores entre 0,124 y 0,182.

Análisis de componentes principales (PCA) sobre las cuatro variables estandarizadas

Para el análisis de componentes principales realizado con las variables estandarizadas (Z-scores), se obtuvo que el muestreo se adecuó apropiadamente ($KMO = 0,753$), mientras que la prueba de esfericidad de Bartlett señaló que la matriz de correlaciones fue apropiada para el análisis [$\chi^2 (6) = 577,53$, $p < 0,001$].

Aplicando el criterio de Kaiser, únicamente un componente presentó un autovalor superior a 1 ($\lambda_1 = 2,270$), explicando el 56,76% de la varianza total. Los demás componentes no se retuvieron al presentar autovalores inferiores ($\lambda_2 = 0,736$, $\lambda_3 = 0,550$, $\lambda_4 = 0,444$). Esto implicó que la rotación Varimax no modificara la solución. El Cuadro 5 resume los estadísticos adicionales de interés del proceso de análisis.

Cuadro 5. Cargas factoriales, comunales y coeficientes de puntuación del componente extraído en el PCA efectuado sobre las variables estandarizadas (Z-scores).

Variable	Carga en componente 1	Comunalidad extraída	Coefficiente de puntuación
Longitud de Hueso	0,815	0,664	0,359
Grosor de Hueso	0,763	0,582	0,336
Fuerza de Quiebre	0,794	0,630	0,350
Luminosidad	0,628	0,395	0,277

Todas las variables saturaron de manera importante ($\geq 0,60$) y presentaron comunales superiores a 0,39, lo que confirma que las cuatro medidas se agrupan en un único factor subyacente que integra de forma coherente, las características físicas del hueso y la luminosidad.

DISCUSIÓN

Parámetros morfológicos y físicos del fémur

La constitución y la salud del hueso constituyen un componente importante del bienestar y un indicador del estado de salud de las aves y de las condiciones de manejo, debido a que las alteraciones en su formación pueden afectar tanto el desempeño productivo como la calidad del producto (Castro et al., 2022; González-Cerón et al., 2015; Grupioni et al., 2015). En este sentido, las dimensiones y propiedades morfométricas de huesos como el fémur y la tibia son utilizadas como indicadores del desarrollo esquelético de las aves (Khan et al., 2023). El fémur presenta un crecimiento acelerado durante las primeras semanas de vida, seguido de un crecimiento más sostenido hasta la edad de cosecha (Behera et al., 2021), por lo que sus dimensiones pueden variar según la edad, el sexo, la línea genética y las condiciones de manejo (Damaziak et al., 2019; Boussouar et al., 2024; Wegner et al., 2024).

Entre los factores de manejo, la nutrición desempeña un papel fundamental en el desarrollo y mineralización del tejido óseo. Una alimentación insuficiente puede resultar en huesos cortos y frágiles, mientras que una adecuada disponibilidad de nutrientes favorece el desarrollo de estructuras óseas de mayor grosor y resistencia (Figueiredo-Alves et al., 2016; Boussouar et al., 2024). Asimismo, las condiciones de alojamiento y la actividad física pueden modificar el desarrollo esquelético, mientras que densidades inadecuadas y condiciones ambientales desfavorables pueden afectar el crecimiento y la integridad estructural del hueso (Pedersen et al., 2020; Sharma et al., 2021; Khan et al., 2023). Factores como el fotoperiodo, la temperatura y la humedad relativa también pueden influir sobre el desarrollo óseo, particularmente en aves de rápido crecimiento, debido a su mayor sensibilidad al estrés térmico (Van der Pol et al., 2015; Guevara-Torres et al., 2021; Liu et al., 2023; Nielsen et al., 2023; Riber y Wurtz, 2024).

En concordancia con lo antes expuesto, la variabilidad observada en los parámetros morfológicos entre granjas podría reflejar la influencia conjunta de factores como la genética, la edad y las condiciones de manejo. En la literatura se han reportado, para pollos de engorde,

longitudes femorales entre 69,9 y 100,0 mm y grosores entre 6,3 y 11,2 mm, aunque estos valores varían según la línea genética, la edad y el sistema de producción (Grupioni et al., 2015; Celik et al., 2022; Khan et al., 2023). Estas diferencias reportadas entre líneas respaldan la necesidad de considerar el componente genético al interpretar la variabilidad morfométrica observada entre las granjas evaluadas.

Por ejemplo, para aves Cobb 500 de 42 días se han descrito longitudes de 97,7–100,0 mm y grosores de 8,76–9,54 mm (Damaziak et al., 2019), mientras que para Ross 308 se han reportado grosores de 11,0–11,5 mm y una longitud media de 78,5 mm (Han et al., 2015; Biesiada-Drzazga et al., 2012). Estas diferencias entre líneas evidencian la importancia de considerar la genética al comparar características morfométricas entre poblaciones.

En las granjas evaluadas, la longitud media del fémur varió entre 67,07 y 77,19 mm, mientras que el grosor osciló entre 7,59 y 9,34 mm. Estos valores se encuentran dentro de los rangos generales descritos para fémures de pollos de engorde, aunque fueron inferiores a valores reportados para aves de líneas comerciales evaluadas a los 42 días de edad (Han et al., 2015; Damaziak et al., 2019). Una posible explicación es que las aves del presente estudio fueron procesadas alrededor de los 40 días, mientras que varios de los valores de referencia corresponden a aves de 42 días. Sin embargo, las diferencias también podrían estar relacionadas con la línea genética y otras condiciones de producción.

En el contexto de producción tropical de Costa Rica, el estrés térmico constituye otro factor relevante para el desarrollo de las aves. Las altas temperaturas pueden afectar el crecimiento y otros indicadores productivos en líneas de rápido crecimiento, debido a su elevada tasa metabólica (Son et al., 2022; Nielsen et al., 2023; Riber y Wurtz, 2024). Por tanto, las diferencias observadas entre granjas podrían estar relacionadas con variaciones en las condiciones ambientales y de manejo propias de cada sistema productivo.

Al igual que las dimensiones morfológicas, la fuerza de quiebre puede variar entre aves debido a factores relacionados con la edad, la genética, la nutrición y el desarrollo estructural del hueso. Una adecuada mineralización favorece la resistencia mecánica, mientras que

deficiencias de calcio, fósforo, minerales traza o vitamina D pueden comprometer el desarrollo cortical y disminuir la capacidad del hueso para soportar cargas (González-Cerón et al., 2015; Stenclova et al., 2016; Muszyński et al., 2017; Li et al., 2020; Boussouar et al., 2024; Muñoz et al., 2025). Asimismo, la edad se ha asociado con un incremento de la resistencia mecánica del hueso (Sharma et al., 2021). La relación entre las características morfológicas y la resistencia también ha sido descrita en aves de engorde, donde una mayor proporción entre el diámetro y la longitud puede favorecer la resistencia a la fractura (Khan et al., 2023). Por otra parte, se ha señalado que alteraciones en la composición de la dieta, como un exceso de metionina, pueden afectar la densidad y porosidad ósea (Liu et al., 2024).

La literatura reporta valores de fuerza de quiebre entre 200 y 300 N (20,39–30,59 kgf) como característicos para fémures de pollos de engorde, aunque también se han descrito intervalos más amplios, entre 138 y 404 N (14,06–41,18 kgf) (Stenclova et al., 2016; Celik et al., 2022). En el presente estudio, las medias de las granjas oscilaron entre 19,40 y 30,37 kgf, por lo que se ubicaron, en su mayoría, dentro del intervalo característico reportado. La granja 5 presentó una media inferior al límite de 20,39 kgf; sin embargo, considerando su desviación estándar y la amplitud de los valores descritos en la literatura, no es posible afirmar que sus fémures presentaran una resistencia baja.

La medición de la L^* de los huesos constituye un parámetro colorimétrico utilizado para evaluar su apariencia y puede relacionarse con la aparición de zonas oscuras después de procesos como la cocción y el congelamiento (Baldo et al., 2013). Aingla (2015) reportó valores de L^* entre 51,55 y 53,31 en tibias de pollos de engorde, considerados dentro de un rango de calidad aceptable. Estos valores son comparables con los obtenidos en el presente estudio para los fémures, cuyas medias se mantuvieron entre 50,46 y 54,97. En todos los casos, superaron el límite de aceptabilidad establecido por la escala DSM® ($L^* > 40$).

Aunque se observaron diferencias significativas en la media de L^* entre algunas granjas, estas diferencias no parecen tener relevancia práctica desde el punto de vista de la clasificación de

los huesos. En ocho de las diez granjas, el 100% de los fémures presentó una luminosidad aceptable, mientras que en las granjas restantes esta proporción fue de 98%. Además, los límites inferiores de los intervalos de confianza al 95% fueron iguales o superiores a 0,93 en todas las granjas. En conjunto, estos resultados indican que, pese a la variabilidad estadística entre granjas, la gran mayoría de los fémures evaluados presentó una luminosidad compatible con la categoría aceptable.

Debe considerarse que la luminosidad evaluada en el presente estudio corresponde al hueso fresco después del procesamiento y no necesariamente predice por completo su comportamiento durante etapas posteriores de transformación. La literatura señala que la congelación y la cocción pueden favorecer la aparición de zonas oscuras en el hueso, cuya incidencia puede variar según la genética y las condiciones de procesamiento (Aingla, 2015; Baldo et al., 2013; Barbut, 2020). Estas alteraciones pueden ser percibidas como defectos por las personas consumidoras, aunque su aceptación puede variar. Por tanto, los valores de L^* obtenidos en este estudio deben interpretarse como una caracterización de la condición del hueso en el momento de la evaluación y no como una medida integral de su comportamiento durante el procesamiento posterior.

En conjunto, los resultados sugieren una asociación positiva entre L^* y las características morfológicas y mecánicas evaluadas. La literatura no establece una relación directa y contundente entre la luminosidad y la fuerza de quiebre; sin embargo, se ha propuesto que diferencias en la mineralización y porosidad del tejido óseo pueden afectar de manera simultánea sus propiedades ópticas y mecánicas (Liu et al., 2024; González-Cerón et al., 2015). En este sentido, factores que afectan el desarrollo y la mineralización del hueso, como la nutrición y las condiciones de alojamiento, podrían influir tanto en sus características estructurales como en su luminosidad (Celik et al., 2022; Boussouar et al., 2024). No obstante, dado que estas variables no fueron evaluadas en el presente estudio, esta posible relación debe considerarse como una hipótesis.

Las asociaciones entre L^* , las dimensiones del fémur y la fuerza de quiebre se examinan a continuación mediante los análisis de correlación y regresión.

Relaciones entre los parámetros morfológicos y físicos del fémur

La evaluación no paramétrica mediante correlaciones de Spearman (Cuadro 3) mostró relaciones positivas y significativas entre los parámetros morfológicos y físicos del fémur. La longitud y el grosor presentaron asociaciones moderadas con la fuerza de quiebre, mientras que las relaciones con L^* fueron más débiles. La asociación más fuerte se observó entre la longitud del fémur y su fuerza de quiebre, seguida de la relación entre longitud y grosor. Por su parte, L^* mostró una mayor asociación con la fuerza de quiebre que con las dimensiones morfológicas.

La asociación entre la longitud del fémur y su fuerza de quiebre puede explicarse por el desarrollo y la mineralización progresiva del tejido óseo durante el crecimiento, necesarios para proporcionar soporte al peso corporal del ave (Leite dos Santos et al., 2024). De manera similar, un mayor grosor cortical se relaciona con un mayor grado de mineralización y, en consecuencia, con una mayor capacidad para soportar cargas mecánicas antes de la ruptura (Boussouar et al., 2024). La correlación observada entre longitud y grosor también coincide con estudios previos en aves de engorde y puede atribuirse al crecimiento alométrico coordinado de la estructura ósea (González-Cerón et al., 2015; Kayode et al., 2016; Celik et al., 2022; Kongpechr et al., 2019).

El modelo de regresión lineal múltiple robusta mostró un ajuste significativo (Cuadro 4), en el que la longitud, el grosor y la fuerza de quiebre explicaron el 17% de la variabilidad observada en L^* , sin evidencia de colinealidad importante. La fuerza de quiebre presentó la mayor contribución relativa ($\beta = 0,207$; $p < 0,001$), seguida de la longitud ($\beta = 0,160$; $p < 0,001$) y el grosor ($\beta = 0,137$; $p = 0,002$), todas asociadas positivamente con L^* . Estos resultados sugieren

que las características morfológicas y mecánicas del fémur contribuyen a explicar la luminosidad, aunque la capacidad predictiva del modelo es limitada, lo que evidencia el carácter multifactorial de L^* . La capacidad explicativa moderada del modelo sugiere que L^* depende de otros factores no incluidos en el presente análisis. Entre los posibles predictores se han señalado la grasa intraósea, factores genéticos como la filamina B (FLNB), indicadores relacionados con la densitometría ósea y la suplementación vitamínica de la dieta (Sallam et al., 2023; Ono et al., 2018; Mbato et al., 2023; Aingla, 2015). Aunque el contenido de cenizas ha sido propuesto como posible predictor de las propiedades óseas (Ono et al., 2018; Hakami et al., 2022), las pruebas preliminares realizadas por los autores en 450 fémures obtenidos bajo condiciones de procesamiento similares no mostraron correlaciones significativas entre el porcentaje de cenizas y la longitud, grosor, fuerza de quiebre o L^* ($p > 0,05$). El contenido medio de cenizas fue de 14,40% (DE = 1,97%), valor similar al 14% reportado para tibias de Cobb 500 cosechadas a los 42 días bajo condiciones de ejercicio limitadas (Mbato et al., 2023). Aunque este valor es inferior al descrito en aves criadas en sistemas de pastoreo con mayor actividad física (34%), debe considerarse que la tibia suele presentar una mineralización superior a la del fémur (Han et al., 2015).

Los resultados son consistentes con una posible relación entre la estructura y composición del hueso y su luminosidad. Una mayor mineralización y una menor porosidad podrían favorecer simultáneamente una mayor resistencia mecánica y una menor absorción de luz, contribuyendo a valores superiores de L^* (Sharma et al., 2021; Sallam et al., 2023). Bajo esta perspectiva, la asociación observada entre L^* , la fuerza de quiebre y las dimensiones del fémur podría reflejar características estructurales compartidas del tejido óseo. Este planteamiento también permite interpretar L^* como un indicador potencial de ciertas características de la integridad ósea, aunque su utilidad como parámetro integral requeriría incorporar variables adicionales relacionadas con la composición y estructura del hueso (Bromfield et al., 2021).

El análisis de componentes principales (PCA) mostró que la longitud, el grosor, la fuerza de quiebre y L^* presentaron una covariación común, resumida en un único componente principal

($\lambda_1 = 2,270$), con saturaciones $\geq 0,60$ y comunalidades superiores a 0,39. Sin embargo, este componente no puede interpretarse directamente como un indicador de calidad ósea, ya que dicha interpretación requeriría su validación frente a indicadores independientes de esta condición. Además, una proporción importante de la variabilidad no fue explicada por el componente retenido, lo que refuerza la necesidad de incorporar otras variables en futuros modelos multivariados. En este sentido, la ausencia de variables como contenido de cenizas, densidad mineral y porosidad constituye una limitación del análisis, aunque estas han sido consideradas en otros estudios para caracterizar las propiedades óseas (Sharma et al., 2021; Santos et al., 2022). Por tanto, no es posible establecer a partir de los resultados del presente estudio relaciones directas entre estas variables y L^* .

CONSIDERACIONES FINALES

El estudio evidenció diferencias entre granjas en las características morfológicas y mecánicas del fémur, con valores de longitud, grosor y fuerza de quiebre dentro de los rangos descritos para pollos de engorde, aunque con variaciones que podrían estar relacionadas con la edad de cosecha, la línea genética y las condiciones de producción. En cuanto a la luminosidad, los fémures evaluados presentaron valores de L^* compatibles con una calidad aceptable según la escala DSM®, con al menos el 98% de los huesos clasificados dentro de esta categoría en todas las granjas.

Se observaron asociaciones positivas y significativas entre L^* y la longitud, el grosor y la fuerza de quiebre del fémur. Estas variables explicaron conjuntamente el 17,1% de la variabilidad de L^* , siendo la fuerza de quiebre el predictor con mayor coeficiente estandarizado. Asimismo, el análisis de componentes principales mostró una covariación parcial entre las variables evaluadas, con un componente que explicó el 56,76% de la varianza total. En conjunto, los resultados sugieren que L^* se relaciona con características morfológicas y mecánicas del fémur y podría constituir un indicador complementario de su condición estructural, aunque su

capacidad explicativa limitada y la naturaleza multifactorial de la calidad ósea impiden considerarla como un indicador único.

En términos aplicados, la evaluación de L^* podría incorporarse como una medida complementaria en la caracterización de la calidad del hueso en pollos de engorde, especialmente por tratarse de un parámetro de medición objetiva y de aplicación sencilla. Su utilidad adquiere mayor relevancia cuando se interpreta junto con variables morfológicas y mecánicas, y puede contribuir a generar criterios de evaluación de la calidad ósea con interés para la producción y el procesamiento avícola.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Centro de Investigación en Nutrición Animal de la Universidad de Costa Rica (CINA), al Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME) de la Universidad de Costa Rica, y a DSM® Nutritional Products por el apoyo material proporcionado para la realización de los ensayos del presente trabajo.

LITERATURA CITADA

Aingla, C. M. (2015). Identificación y valoración del síndrome de hueso negro en tres marcas comerciales de tres supermercados de la ciudad de Sangolquí en pollo procesado utilizando el colorímetro Minolta [Tesis de grado]. Universidad Central del Ecuador. <https://www.dspace.uce.edu.ec/entities/publication/db59c78d-8c80-4f1c-99ab-27f234fa89dd>

- Baldo, G. A. A., Almeida-Paz, I. C. L., Alves, M. C. F., Nääs, I. A., Garcia, R. G., Caldara, F. R. & Gavilan, C. W. S. (2013). Black bone syndrome in chicken meat. *Brazilian Journal of Poultry Science*, 15 (4), 317–322. <https://doi.org/10.1590/S1516-635X2013000400005>
- Barbut, S. (2020). Meat Industry 4.0: A Distant Future? *Animal Frontiers*, 10 (4), 38–47. <https://doi.org/10.1093/af/vfaa038>
- Behera, M., Sathapathy, S. & Mandal, A.K. (2021). Gross morphometrical changes in leg bones of post-hatch male broiler chickens with special reference to growth plate cartilage. *Exploratory Animal and Medical Research*, 11 (2), 188-197. <https://doi.org/10.52635/eamr/11.2.188-197>
- Biesiada-Drzazga, B., Bombik, T., Rojek, A., Kubiak, M., Penda, M. & Brodzik, U. (2012). Growth of selected bones and muscle groups in broiler chickens during rearing period. *Acta Scientiarum Polonorum Zootechnica*, 11 (1), 25–34. <https://asp.zut.edu.pl/pdf/asp-2012-11-1-137.pdf>
- Boussouar, H., Khenenou, T., Bennoune, O., Lamraoui, R., Fares, M.A., Rahmoun, D.E., Kadrine, N., Benrezak, S. & Kahoul, M.A. (2024). Effects of a Diet Low in Vitamin and Mineral Complex and Darkness on the Growth Performance, Mineralization and Femur Histological Structure of Broiler Chickens. *Agricultural Science Digest*, 44 (2), 355-361. <https://doi.org/10.18805/ag.DF-577>
- Bromfield, J.I., Hoffman, L. C., Horyanto, D. & Soumeh, E. A. (2021). Enhancing Growth Performance, Organ Development, Meat Quality, and Bone Mineralisation of Broiler Chickens through Multi-Enzyme Super-Dosing in Reduced Energy Diets. *Animals*, 11(19): 2791, <https://doi.org/10.3390/ani11102791>.
- Castro, S., da Silva, I., Nazareno, A. & Mota, M. (2022). Computer vision for morphometric evaluation of broiler chicken bones. *Engenharia Agrícola*. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v42nepe20210150/2022>
- Celik, T., Ağın, B. & Kisioglu, Y. (2022). Evaluations of mechanical properties for free-range and caged chicken femurs. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 22 (1), 68-78. <https://doi.org/10.1080/14484846.2022.2066838>
- Damaziak, K., Charuta, A., Niemiec, J., Tatara, M., Krupski, W., Gozdowski, D. & Kruzińska, B. (2019). Femur and tibia development in meat-type chickens with different growth potential for 56 days of rearing period. *Poultry Science*, 98 (12), 7063-7075. <https://doi.org/10.3382/ps/pez445>

- de Melo, M. C. A., Gomes, H. M., Faria, N. N. P., Freitas, E. R., Watanabe, P. H., Watanabe, G. C. A., Souza, D. H. & Fernandes, D. R. (2020). Black bone syndrome in broilers fed ethanolic extract of mango seeds. *Poultry Science*, 99 (1), 3229–3236. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.02.003>
- Delacre, M., Leys, C., Mora, Y. L. & Lakens, D. (2019). Taking parametric assumptions seriously: Arguments for the use of Welch's F-test instead of the classical F-test in one-way ANOVA. *International Review of Social Psychology*, 32 (1), Article 13. <https://doi.org/10.5334/irsp.198>
- Figueiredo-Alves, M.C., Paz, I., Nääs, I., Garcia, R., Caldara, F., Baldo, G., Garcia, E. & Molino, A. (2016). Locomotion of commercial broilers and indigenous chickens. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 45 (7), 372–379. <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-92902016000700003>
- González-Cerón, F., Rekaya, R. & Aggrey, S.E. (2015). Genetic analysis of bone quality traits and growth in a random mating broiler population. *Poultry Science*, 94 (5), 883–889. <http://dx.doi.org/10.3382/ps/pev056>
- Grupioni, N.V., Cruz, V.A.R, Stafuzza, N.B., Freitas, L.A., Ramos, S.B., Savegnago, R.P., Peixoto, J.O., Ledur, M.C. & Munari, D.P. (2015). Phenotypic, genetic and environmental parameters for traits related to femur bone integrity and body weight at 42 days of age in a broiler population. *Poultry Science*, 94 (11), 2604–2607. <https://doi.org/10.3382/ps/pev257>
- Guevara-Torres, B., Landin-Grandvallet, L., Tirado-Madrid, A. & Villagómez-Cortés, J. (2021). Comparison of Locomotion Problems and Its Economic Impact on Cobb and Ross Broiler Strains. *Veterinary Science Research*, 03 (02). <https://doi.org/10.30564/vsr.v3i2.4126>
- Habtzghi, D., Midha, C. K. & Das, A. (2014). Modified Clopper–Pearson confidence interval for binomial proportion. *Journal of Statistical Theory and Applications*, 13 (4), 296. <https://doi.org/10.2991/jsta.2014.13.4.3>
- Hakami, Z., Al Sulaiman, A., Alharthi, A., Casserly, R., Bouwhuis, M. & Abudabos, A. (2022). Growth performance, carcass and meat quality, bone strength, and immune response of broilers fed low-calcium diets supplemented with marine mineral complex and phytase. *Poultry Science*, 101 (6), 101849. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.101849>

- Han, J.C., Qu, H.X., Wang, J.G., Chen, G.H., Yan, Y.F., Zhang, J.L., Hu, F.M., You, L.Y. & Cheng, Y.H. (2015). Comparison of the Growth and Mineralization of the Femur, Tibia, and Metatarsus of Broiler Chicks. *Revista Brasileira de Ciência Avícola*, 17 (3), 333-339. <https://doi.org/10.1590/1516-635X1703333-340>
- Herrera, N. A., Del Pilar, A. & Martínez, C. M. (2015). Identificación y valoración del síndrome de hueso negro en tres marcas comerciales de tres supermercados de la ciudad de Sangolquí en pollo procesado utilizando el colorímetro Minolta (Tesis de grado). Universidad Central del Ecuador. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/6915>
- International Business Machines Corporation (IBM). (2017). IBM SPSS Statistics (version 25) (Software). <https://www.ibm.com/products/spss-statistics>
- Jarama-Peñaloza, C. F. (2016). Evaluación de caracteres de crecimiento y mortalidad en dos líneas de pollo de engorde en condiciones de altitud (Tesis de grado). Universidad Politécnica Salesiana. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/12733>
- Jolliffe, I.T. & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: a review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>
- Kayode, Z., Omolara, M. & Osamede, O. (2016). Effect of strain and age on bone integrity of commercial broiler chickens. *Biotechnology in Animal Husbandry*, 32 (2), 195-203. <https://doi.org/10.2298/BAH1602195S>
- Khan, K., Kaya, M., Fidan, E.D. & Kilimci, F.S. (2023). Impact of litter on femur and tibial morphology, bone biomechanics, and leg health parameters in broiler chickens. *Animal Bioscience*, 36 (9), 1393-1402. <https://doi.org/10.5713/ab.22.0335>
- Kongpechr, S., Sohsuebngarm, D. & Sukon, P. (2019). Model Estimation for Longitudinal Bone Growth Based on Age in Male and Female Commercial Broiler Chickens. *Journal of World's Poultry Research*, 9 (3), 124-132. <https://dx.doi.org/10.36380/jwpr.2019.15>
- Leite dos Santos, J., Amoroso, L., Silverio, F. C., Costa, A. V., Silva, M. C., Artoni, S. M. B., Costa, G. C., & Rubio, M. S. (2024). Musculoskeletal and visceral quality of broilers with different body patterns. *Brazilian Journal of Poultry Science*, 26(3), 1-8. <https://doi.org/10.1590/1806-9061-2023-1880>

- Li, T., Xing, G., Shao, Y., Zhang, L., Li, S., Lu, L., Liu, Z., Liao, X. & Luo, X. (2020). Dietary calcium or phosphorus deficiency impairs the bone development by regulating related calcium or phosphorus metabolic utilization parameters of broilers. *Poultry Science*, 99 (6), 3207-3214. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.01.028>
- Liu, G., Choppa, V.S.R., Sharma, M.K., Ko, H., Choi, J. & Kim, W.K. (2024). Effects of Methionine Supplementation Levels in Normal or Reduced Protein Diets on the Body Composition and Femur Bone Characteristics of Broilers Challenged with Coccidia. *Animals*, 14 (6), 917. <https://doi.org/10.3390/ani14060917>
- Liu, K., He, Y., Xu, B., Lin, L., Chen, P., Iqbal, M., Mehmood, K. & Huang, S. (2023). Leg disorders in broiler chickens: a review of current knowledge. *Animal Biotechnology*, 34 (9), 5124-5138. <https://doi.org/10.1080/10495398.2023.2270000>
- Lu, Y.N., Yue, T.J., Ding, W.L., Xu, B.W., Li, A.Y. & Huang, S.C. (2025). Gut–X axis and its role in poultry bone health: A review. *Microorganisms*, 13 (4), 757. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13040757>
- Mbato, P., Mutinda, W., Maritim, N. & Odongo, N. (2023). Free-Range Production System can Improve Bone Strength in Broilers. *International Journal of Poultry Science*, 22 (1), 119-125. <https://doi.org/10.3923/ijps.2023.119.125>
- Muñoz, J., Martins, T., Garbossa, P., Pimentel, L., Barbalho, C., da Silva, M., de Arruda, A., Baraldi-Artoni, S., Araújo, C. & Pereira, A. (2025). Bone development of broiler chickens supplemented with chondroitin sulfate and manganese. *Veterinary and Animal Science*, vol. 29. <https://doi.org/10.1016/j.vas.2025.100485>
- Muszyński, S., Tomaszewska, E., Kwiecień, M., Dobrowolski, P. & Tomczyk, A. (2017). Effect of Dietary Phytase Supplementation on Bone and Hyaline Cartilage Development of Broilers Fed with Organically Complexed Copper in a Cu-Deficient Diet. *Biological Trace Element Research*, 182 (1), 339-353. <https://doi.org/10.1007/s12011-017-1092-1>
- Nielsen, S., Alvarez, J., Bicout, D., Calistri, P., Canali, E., Drewe, J., Garin-Bastuji, B., Rojas, J., Schmidt, C., Herskin, M., Chueca, M., Michel, V., Padalino, B., Pasquali, P., Roberts, H., Spooler, H., Stahl, K. & Velarde, A. (2023). Welfare of broilers on farm. European Food Safety Authority. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2023.7788>

- Ono, R.K., Ibelli, A.M.G., Cantão, M.E., Peixoto, J. de O., Sollero, B. P., Surek, D., Moreira, G.C.M., Godoy, T.F., Coutinho, L.L. & Ledur, M.C. (2018). Genome-wide association study for femur-related traits in broilers. *Proceedings of the World Congress on Genetics Applied to Livestock Production*, 11 (1), 655. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1093205/1/final8692.pdf>
- Pedersen, I., Tahamtani, F., Forkman, B., Young, J., Poulsen, H. & Riber, A. (2020). Effects of environmental enrichment on health and bone characteristics of fast growing broiler chickens. *Poultry Science*, 99 (4), 1946-1955. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2019.11.061>
- Riani, M., Atkinson, A. & Corbellini, A. (2023). Robust Transformations for Multiple Regression via Additivity and Variance Stabilization. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 33 (1):1-19. <https://doi.org/10.1080/10618600.2023.2205447>
- Riber, A. B. & Wurtz, K. E. (2024). Impact of growth rate on the welfare of broilers. *Animals*, 14 (22), 3330. <https://doi.org/10.3390/ani14223330>
- Rymarz, J., Niewczas, A., Hołyszko, P. & Debicka, E. (2022). Application of Spearman's Method for the Analysis of the Causes of Long-Term Post-Failure Downtime of City Buses. *Applied Sciences*, 12 (6), 2921. <https://doi.org/10.3390/app12062921>
- Salas, A. C. (2018). Síndrome de hueso negro y el efecto 250H colecálciferol en las dietas de pollos de engorde [Presentación de congreso]. VI Congreso Nacional de Nutrición Animal y Producción Industrial de Alimentos Balanceados, Heredia, Costa Rica. <http://www.ciabcr.com/actividadeshistorial.html>
- Sallam, M., Wilson, P.W., Andersson, B., Schmutz, M., Benavides, C., Dominguez-Gasca, N., Sanchez-Rodriguez, E., Rodriguez-Navarro, A., Dunn, I., De Koning, D. & Johnsson, M. (2023). Genetic markers associated with bone composition in Rhode Island Red layinghens. *Genetics Selection Evolution*, 44 (1). <https://doi.org/10.1186/s12711-023-00818-x>
- Santos, M. N., Widowski, T. M., Kiarie, E. G., Guerin, M. T., Edwards, A. M., & Torrey, S. (2022). In pursuit of a better broiler: Tibial morphology, breaking strength, and ash content in conventional and slower-growing strains of broiler chickens. *Poultry Science*, 101(4), Article 101755. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.1017>

- Sharma, M., White, D., Chen, C., Kim, W. & Adhikari, P. (2021). Effects of the housing environment and laying hen strain on tibia and femur bone properties of different laying phases of Hy-Line hens. *Poultry Science*, 100 (3), 100933. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.12.030>
- Son, J., Kim, H., Hong, E. & Kang, H. (2022) Effects of Stocking Density on Growth Performance, Antioxidant Status, and Meat Quality of Finisher Broiler Chickens under High Temperature. *Antioxidants*, 11 (5), 871. <https://doi.org/10.3390/antiox11050871>
- Stenclova, H., Karasek, F., Šťastník, O. & Ladislav, Z. (2016). The effect of dietary zinc and calcium content on the femur bone strength of broilers. International Ph.D. Students Conference on MendelNet. Nov. 2016. República Checa. <https://mendelnet.cz/pdfs/mnt/2016/01/53.pdf>
- Uculmana-Morales, C. G. (2015). Efecto de la relación calcio: fósforo disponible sobre el crecimiento alométrico, morfometría, integridad y mineralización ósea en pollos de engorde (Tesis de grado). Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/1369556>
- van der Pol, C., Molenaar, R., Buitink, C., van Roover-Reijrink, I., Maatjens, C., van den Brand, H. & Kemp, B. (2015). Lighting schedule and dimming period in early life: consequences for broiler chicken leg bone development. *Poultry Science*, 94 (12), 2980-2988. <https://doi.org/10.3382/ps/pev276>
- Wegner, M., Kokoszyński, D. & Piwczyński, D. (2024). The effect of genotype and sex on carcass composition, digestive system and leg bone traits in broiler breeders after the reproductive season. *Animal Science Papers and Reports*, 42 (4), 431-444. <https://doi.org/10.2478/aspr-2023-0047>