

CAMBIOS EN LA ASIMETRÍA FLUCTUANTE EN EL HÚMERO DE LA GAVIOTA PATIAMARILLA MEDITERRÁNEA (*LARUS MICHAELLIS*) (LARIDAE: CHARADRIIFORMES)

por PARÉS-CASANOVA, PERE M.

INSTITUCIÓ CATALANA D'HISTÒRIA NATURAL, CATALUÑA

PPPARES@UOC.EDU

inestabilidad del desarrollo, análisis de Procrustes generalizado, morfometría geométrica, forma.

Keywords: development instability, generalized Procrustes analysis, geometric morphometrics, shape.

Resumen: En esta investigación, los autores aplicamos la medición de posibles asimetrías bilaterales en los húmeros de 16 gaviotas patiamarilla mediterránea (*Larus michahellis*), recurriendo a radiografías en proyección ventro-dorsal y estudio de las imágenes mediante métodos de morfometría geométrica. La muestra analizada mostró asimetría fluctuante (AF), tanto en el tamaño como en la forma pura, pero no asimetría direccional (AD) ni antisimetría. Fueron los elementos proximales del húmero los que mostraron una mayor cantidad de asimetría, lo que sugiere que la carga mecánica es mayor en estas áreas y por tanto se sugeriría que son elementos biomecánicos más que estrés ambiental los responsables de la asimetría detectada. No apareció AD marcada en la curvatura, lo que apoyaría la hipótesis que las fuerzas compresivas en el brazo no son diferentes en ambos lados. Pero se detectaron cambios de AF con el tamaño, lo que sugeriría además que esta asimetría se desarrolla durante el crecimiento óseo endocondral.

Abstract: In this research, the authors applied geometric morphometric techniques to assess possible bilateral asymmetries in humeri of 16 yellow-legged gulls (*Larus michahellis*), based on radiographic ventro-dorsal projections. The sampled reflected fluctuating asymmetry (FA), both in size and shape, but no directional asymmetry (DA) neither antisymmetry. Humeral proximal elements showed the showed a greater amount of asymmetry, which suggests that mechanical load is greater in these areas and are therefore biomechanical factors rather than environmental stress are responsible for detected asymmetry. DA was not significative, which would support the hypothesis that compressive forces of the arm are not different on both sides. FA changed with size, which would also suggest that it develops during endochondral bone growth.

Introducción: Los estudios sobre desarrollo morfológico destacan la interacción de una gran cantidad de condiciones y variables para llegar a generar una estructura funcional. Así, por ejemplo, la variación en la alimentación, temperatura, fragmentación de hábitat, densidad y contaminantes de población puede conducir a la inestabilidad del desarrollo. Se denomina inestabilidad del desarrollo (ID) (o “ruido del desarrollo”) a la tendencia de un sistema de desarrollo a producir cambios morfológicos como respuesta a perturbaciones aleatorias (Auffray, Debat, and Alibert 1999; Angelopoulou, Vlachou, and Halazonetis 2009; Lima et al. 2016). Dado que tales perturbaciones pueden ser visibles a nivel del fenotipo, la existencia de cambios fenotípicos puede indicar el grado al que un organismo responde a estos estresores (Coster et al. 2013).

En este contexto, el patrón de simetría de las estructuras bilaterales ha sido ampliamente utilizado como un marcador de ID (Lens et al. 2002; Coster et al. 2013; Lima et al. 2016) puesto que, dado que ambos lados de un organismo están bajo el mismo

control genético durante su desarrollo, se espera que cualquier desviación de la simetría es el producto de disturbios locales que romperían la homeostasis del desarrollo (Coster et al. 2013).

La asimetría puede ser descrita por la distribución de frecuencia de la diferencia entre lo lados izquierdo y el derecho de los individuos de una población (Graham, Freeman, and Emlen 1993). En general, hay tres principales tipos de asimetría bilateral: asimetría fluctuante (AF), asimetría direccional (AD) y antisimetría (AS) (Zelditch, Swiderski, and Sheets 2004). AF presenta un modelo de variación en la que las desviaciones de la simetría se distribuyen cerca de una media de cero, y son al azar y no direccionales (Lopez Galan 2016). Las desviaciones pueden distribuirse preferentemente en una dirección, generando entonces AD -o sea, cuando hay una tendencia para el desarrollo excesivo de un lado con relación al otro-. Por último, en AS se detecta que un lado es generalmente mayor que el otro, pero la posición de la parte más grande varía al azar en la población, conduciendo a una distribución bimodal de las diferencias entre los lados izquierdo y derecho.

De los tres tipos de asimetría, AF ha sido considerado como una medida de ID, ya que refleja la incapacidad de un organismo para hacer frente a factores estresantes y las perturbaciones resultantes durante el desarrollo (Graham et al. 2010). AF, pues, se suele interpretar como un buen indicador de estrés ambiental (Auffray, Debat, and Alibert 1999; Coster et al. 2013). Se considera que AD y AS tienen, por su lado, una base genética (Cocilovo, Varela, and Quevedo 2006; Zachos, Hartl, and Suchentrunk 2007).

En esta investigación, se aplicó la medición de posibles asimetrías (AF y AD) en húmeros de gaviota patiamarilla (*Larus michahellis michahellis*) a partir de imágenes de rayos X, presuponiendo que la asimetría ósea debe reflejar con mayor precisión la asimetría que los rasgos relacionados con el plumaje (p. ej. longitud de ala o cola). Como es el caso con la fotografía digital, podemos considerar la radiografía particularmente apropiada cuando las características del objeto estudiado pueden ser representadas en dos dimensiones, como es el caso de los huesos largos. Sin embargo, a pesar de este gran potencial, la técnica radiográfica ha sido raramente utilizada en estudios de esta índole.

L. michahellis es la gaviota más abundante en la región paleártica sudoeste (Hume et al. 2021). La especie está actualmente dividida en tres subespecies: *L. m. atlantis*, que se limita a las islas Macaronésicas, *L. m. michahellis*, que ocupa principalmente las costas mediterráneas y *L. m. lusitanicus* que se reproduce a lo largo de la costa atlántica de la Península Ibérica (Galarza et al. 2012).



Figura 1. Proyección ventro-dorsal de los especímenes estudiados de *Larus michahellis*. En cada húmero, derecho e izquierdo, se situó un total de 12 puntos homólogos.

Material y métodos:

Muestra

Se estudiaron 16 gaviotas adultas patiamarillas mediterráneas (*Larus michahellis michahellis*) procedentes de una campaña de erradicación del P.N. del Delta de l'Ebre, Cataluña, SW de España, durante el período de cría. Ninguno de los animales presentaba patologías aparentes, y en todos los casos su estado corporal era bueno. Los especímenes no se sexaron.

Obtención de las imágenes

De cada animal se obtuvo una imagen radiográfica en proyección ventro-dorsal, que incluía ambos húmeros, utilizando siempre el mismo aparato y posicionamiento. Estas imágenes de rayos X fueron utilizadas para el análisis morfométrico. Posteriormente, en la imagen digitalizada de cada húmero derecho e izquierdo se situaron 12 puntos homólogos (“landmarks”) (Figura 1). Los puntos de referencia pueden definirse como puntos anatómica o geométricamente homólogos entre estructuras. Cada punto fue digitalizado dos veces en cada ala en diferentes sesiones independientes para permitir estimar el error de medición.

Las configuraciones de los puntos fueron superpuestas usando el Análisis Generalizado de Procrustes (AGP). El AGP comienza reflejando configuraciones representativas de uno de los lados y superponiéndolos por su centroide (punto a media de una configuración de puntos homólogos) (Bookstein 1991). Como resultado de todos estos cálculos, al haber eliminado las diferencias de escala, rotación y posición, se permite una comparación precisa de la forma (Bookstein 1991). El tamaño del centroide, la raíz cuadrada de la suma de las distancias cuadradas de un sistema de señal a su centroide, entonces se escala a uno (Bookstein 1991).

Análisis estadístico

La asimetría de la forma se analizó mediante un ANOVA de Procrustes, de manera que la identidad del espécimen considerada como efecto aleatorio y lateral del húmero se usó como un efecto fijo. En particular, el efecto principal entre especies representa la variación de la forma individual, el efecto del lado del cuerpo correspondió a la asimetría direccional (AD), la interacción entre el lado del cuerpo y la identidad del espécimen correspondió a fluctuar la asimetría fluctuante (AF) y el residuo correspondieron al error de medición en el modelo. En el ANOVA de Procrustes, los grados de libertad se calculan multiplicando el número de grados de libertad de cada factor por

el número total de dimensiones en el espacio de forma. Finalmente, el comportamiento alométrico de AF en relación con el tamaño se testó un análisis de regresión utilizando la variable “componente asimétrico” como valor dependiente, y “tamaño de centroide” como valor independiente. La antisimetría (AS) en forma de ala se analizó utilizando un diagrama de distribución las diferencias entre el lado izquierdo y el derecho para todos los puntos. La aparición de

una distribución bimodal en las diferencias entre los lados izquierdo y derecho. Esta diferencia derecha-izquierda se corroboró con una prueba pareado W de Wilcoxon. La visualización de los cambios en la forma se basó en las rejillas de deformación.

Todos los análisis se realizaron utilizando el software MorphoJ v. 1.05c (Klingenberg 2011) y PAST v. 4.17c (Hammer, Harper, and Ryan 2024).

Tabla 1. Resultados del ANOVA de Procrustes del tamaño y forma pura los húmeros de 16 gaviotas adultas patiamarillas mediterráneas (*Larus michahellis michahellis*). La partición de varianza obtenida del ANOVA de Procrustes indicó la interacción entre el lado y la identidad de la muestra (AF, asimetría fluctuante) fue significativa, pero no el efecto del lado del cuerpo (AD, asimetría direccional), tanto para la forma como para el tamaño. En todos los casos, el error fue menor que las dos asimetrías analizadas.

Tabla 1: Resultados del ANOVA de Procrustes del tamaño y forma pura.

Tamaño					
Efecto	SS	MS	g.l.	F	P
*Individuo	287702,539696	19180,16931	15	45,27	<.0001
AD	158,884058	158,88405	1	0,38	0,5494
AF	6354,673705	423,64491	15	5,62	<.0001
Error	2109,316008	75,33200	28		

Forma pura					
Efecto	SS	MS	g.l.	F	P
Individuo	0,01221003	0,0000407001	300	1,27	0,0203
AD	0,00061684	0,0000308418	20	0,96	0,5109
AF	0,00963542	0,0000321181	300	1,32	0,0026
Error	0,01360880	0,0000243014	560		

g.l.: grados de libertad

Requerimientos éticos

Se trabajó con cadáveres procedentes de campañas de erradicación, por lo que en ningún caso se procedió al sacrificio ex profeso para este estudio de los animales analizados.

Resultados:

La partición de varianza obtenida del ANOVA de Procrustes indicó la interacción entre el lado y la identidad de la muestra fue significativa, pero no el efecto del lado del cuerpo, tanto para la forma como para el tamaño (tabla 1), implicando no sólo que *Larus michahellis michahellis* tiene AF, significativa, aunque baja, en la forma humeral, sino también que el nivel de AF aparecía mayor que el error (un 25,09 versus un 18,99 %). La asimetría apareció correlacionada con el tamaño, explicando esta variable

un 12,96 % del cambio (Figura 2). La distribución de las diferencias entre lados, finalmente, presentó una distribución monomodal (Figura 3), con lo que se descartó una posible AS. La prueba de Wilcoxon reforzó esta conclusión, al no aparecer diferencias estadísticamente significativas entre lados ($W=211$; $p=0,667$).

Los puntos localizados en las partes proximales del húmero fueron los que presentaron mayor AF, especialmente los tubérculos dorsal y ventral para inserción muscular (Figura 4).

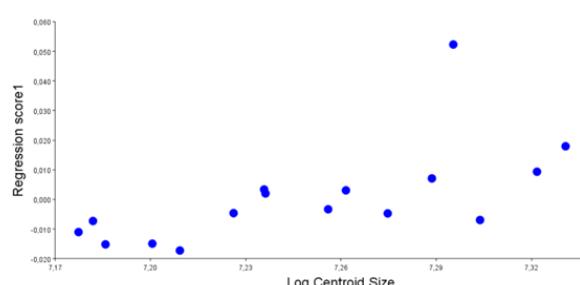


Figura 2. Correlación de la asimetría con el tamaño. El tamaño explicó un 12,96 % del cambio.

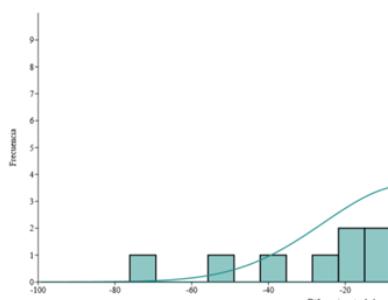


Figura 3. Distribución de las diferencias derecha-izquierda del tamaño de centroide para los húmeros de 16 gaviotas adultas patiamarillas mediterráneas (*Larus michahellis michahellis*). Promedio: -3,25; sesgo: -1,636; curtosis: 3,321. La prueba de Wilcoxon demostró la ausencia de diferencias estadísticamente significativas entre lados ($W=211$; $p=0,667$).

Discusión:

AF se ha asociado como indicador de ID, posiblemente reflejando cambios ambientales (Reeves, Auerbach, and Sylvester 2016; Rivero-Aragón, Suárez-Hernández, and Alvaré-Jaramillo 2018; Niemeier, Müller, and Rödel 2019). Sí que se reconoce ampliamente que las presiones medioambientales pueden afectar el desarrollo de un organismo y, por tanto, generar AF, que aumenta con la tasa de crecimiento. O, dicho de otro modo, la “precisión simétrica” se ve mermada cuando se destina más energía al crecimiento que a la “corrección simétrica”. Refuerza esta hipótesis que, en la presente investigación, se detecten cambios de AF con el tamaño de *L. michahellis* O sea, que esta asimetría se desarrolla durante el crecimiento óseo endocondral y el pertinente desarrollo muscular.

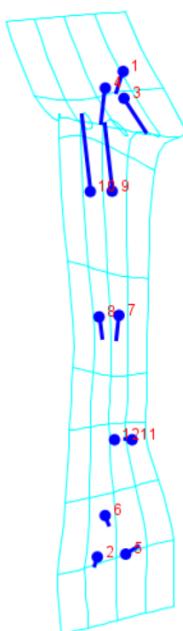


Figura 4. Cambios en la forma pura los húmeros de 16 gaviotas adultas patiamarillas mediterráneas (*Larus michahellis michahellis*). Los puntos localizados en las partes proximales del húmero (1, 3, 4, 9 y 10) fueron los que presentaron mayor cambio.

Fueron los elementos proximales del húmero los que mostraron una mayor cantidad de asimetría, lo que sugiere que la carga mecánica es bilateralmente diferente en estas áreas y, por tanto, responsable de la asimetría detectada. La explicación más probable para la asimetría promedio observada se debe a un desequilibrio funcional debido a preferencias de lado que se traducen en un tirón desigual de los músculos pareados sobre el húmero, desigualdad que se verá aumentada a medida que el animal crece, probablemente por el aumento de la masa muscular y, por ende, peso. Al no aparecer asimetría en la curvatura del hueso, se descartaría, en cambio, que las fuerzas compresivas sean bilateralmente diferentes.

Conflictos de intereses:

El autor declara no tener ningún conflicto de interés.

Agradecimientos:

El autor agradece las facilidades ofrecidas desde el “Parc Natural del Delta de l’Ebre” para la entrega de los cuerpos de los animales estudiados.

Bibliografía:

- Angelopoulou, M.V., V. Vlachou, and D.J. Hazonetis. 2009. “Fluctuating Molar Asymmetry in Relation to Environmental Radioactivity.” *Archives of Oral Biology* 54(7): 666–70.
- Auffray, J.C., V. Debat, and P. Alibert. 1999. “Shape Asymmetry and Developmental Stability.” In *On Growth and Form: Spatio-Temporal Pattern Formation in Biology*, ed. J.C. McLachlan Mark A.J. Chaplain, G.D. Singh. New York: John Wiley and Sons Ltd, 309–324.
- Bookstein, F.L. 1991. Morphometric Tools for Landmark Data: Geometry and Biology *Morphometric Tools for Landmark Data: Geometry and Biology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Cocilovo, J.A., H.H. Varela, and S. Quevedo. 2006. “La Asimetría Bilateral y La Inestabilidad Del Desarrollo.” *Revista argentina de antropología biológica* 8(1): 121–44.
- Coster, G. de et al. 2013. “Fluctuating Asymmetry and Environmental Stress: Understanding the Role of Trait History.” *PLoS ONE* 8(3): 1–9.

- Galarza, A. et al. 2012. "Movements of Mediterranean Yellow-Legged Gulls Larus Michahellis to the Bay of Biscay." *Ringing and Migration* 27(1): 26–31.
- Graham, J.H., D.C. Freeman, and J.M. Emlen. 1993. "Antisymmetry, Directional Asymmetry, and Dynamic Morphogenesis." *Genetica* 89(1–3): 121–37.
- Graham, J.H., S. Raz, H. Hel-Or, and E. Nevo. 2010. "Fluctuating Asymmetry: Methods, Theory, and Applications." *Symmetry* 2: 466–540.
- Hammer, Ø., D.A.T. Harper, and P.D. Ryan. 2024. "PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis." *Palaeontologia Electronica* 4(1): 1–229.
- Hume, R., R. Still, A. Swash, and H. Harrop. 2021. Europe's Birds. An Identification Guide. New Jersey: *Princeton University Press*.
- Klingenberg, C.P. 2011. "MorphoJ: An Integrated Software Package for Geometric Morphometrics." *Molecular Ecology Resources* 11(2): 353–57.
- Lens, L., S. Van Dongen, S. Kark, and E. Matthyssen. 2002. "Fluctuating Asymmetry as an Indicator of Fitness: Can We Bridge the Gap between Studies?" *Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society* 77(1): 27–38.
- Lima, C.B.S. et al. 2016. "Morphometric Differences and Fluctuating Asymmetry in *Melipona Subnitida* Ducke 1910 (Hymenoptera: Apidae) in Different Types of Housing." *Brazilian Journal of Biology* 76(4): 845–50.
- Lopez Galan, A. 2016. "Morfometría Geométrica: El Estudio de La Forma y Su Aplicación En Biología." *Temas de Ciencia y Tecnología* 19(55): 53–59.
- Niemeier, S., J. Müller, and M.O. Rödel. 2019. "Fluctuating Asymmetry – Appearances Are Deceptive. Comparison of Methods for Assessing Developmental Instability in European Common Frogs (*Rana Temporaria*)."*Salamandra* 55(1): 14–26.
- Reeves, N.M., B.M. Auerbach, and A.D. Sylvester. 2016. "Fluctuating and Directional Asymmetry in the Long Bones of Captive Cotton-Top Tamarins (*Saguinus Oedipus*)."*American Journal of Physical Anthropology* 51(December 2015): 41–51.
- Rivero-Aragón, A., A.M. Suárez-Hernández, and A. Alvaré-Jaramillo. 2018. "Evolution of Population Level Lateralization in *Dysdercus Andreae* L. (Heteroptera: Pyrrhocoridae)." *Centro Agrícola* 45(4): 75–84.
- Zachos, F.E., G.B. Hartl, and F. Suchentrunk. 2007. "Fluctuating Asymmetry and Genetic Variability in the Roe Deer (*Capreolus Capreolus*): A Test of the Developmental Stability Hypothesis in Mammals Using Neutral Molecular Markers." *Heredity* 98(6): 392–400.
- Zelditch, M.L., D.L. Swiderski, and H.D. Sheets. 2004. *Geometric Morphometrics for Biologists: A Primer*. Boston: Elsevier Academic Press.