

## MORFOMETRÍA GEOMÉTRICA: TO WARP OR NOT TO WARP

*Héctor López Rojas*

Laboratorio de Ictiología, Centro Museo de Biología de la UCV (CMBUCV),  
Instituto de Ecología y Zoología Tropical. Facultad de Ciencias, Universidad  
Central de Venezuela. hector.lopez@ciens.ucv.ve

### RESUMEN

Aunque la cuantificación de la forma biológica mediante la Morfometría Geométrica es una disciplina altamente atractiva, no es de data reciente. En el siglo 19, los avances matemáticos de autores como Francis Galton, Karl Pearson y Charles Spearman, entre otros, permitieron el estudio cuantitativo de los organismos o de sus partes mediante el estudio univariado o bivariado de caracteres simples, de correlaciones de dos o más caracteres y análisis factoriales de caracteres múltiples. Es, sin embargo, la percepción de D'arcy Thompson (1860-1948) en su obra más citada, *On Growth and Form*, de que las formas biológicas podrían ser analizadas geoméricamente, conjuntamente con el desarrollo de métodos matemáticos sofisticados y un mayor poder computacional, lo que condujo a autores modernos, muy especialmente Kendall, Bookstein, Rohlf y otros, a mediados de los años 80 del siglo XX, al desarrollo de la disciplina que conocemos actualmente como Morfometría Geométrica. En el presente ensayo se señala el riesgo de que la Morfometría Geométrica, asentada en el uso de sofisticadas herramientas para el estudio de los cambios de la forma, podría dar la impresión equivocada de certidumbre a aquellos que se aproximan a ella sin el necesario discernimiento biológico.

**Palabras clave:** Forma, Cuantificación, Morfometría Geométrica, Precauciones.

## Geometric Morphometrics: To warp or not to warp

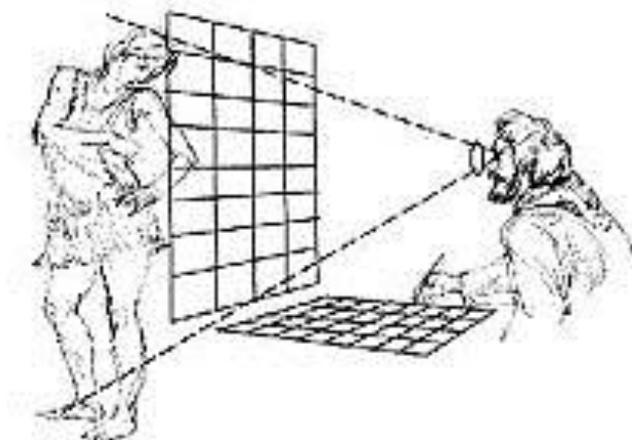
### Abstract

Although quantification of the biological form by Geometric Morphometry is nowadays a highly attractive discipline, it is by no means recent. In the 19th century, mathematical advances by authors such as Francis Galton, Karl Pearson, and Charles Spearman, among others, allowed for the quantitative study of organisms or their parts by means of the univariate or bivariate study of simple characters, by the correlations of two or more characters, or by factorial analyses of multiple characters. It is, however, the views of D'arcy Thompson (1860-1948) in his most cited work, *On Growth and Form* –that biological forms could be analyzed geometrically–, aided by sophisticated mathematical developments and greater computational power, that guided modern authors, especially Kendall, Bookstein, Rohlf, and others, in the mid-1980s, to develop the discipline we now know as Geometric Morphometry. In the present essay we caution that Geometric Morphometry, based on the use of sophisticated tools for the study of the changes of the form, could give a mistaken impression of certainty to those who approach it without the necessary biological discernment.

**Keywords:** Form, Quantification, Geometric Morphometry, Caveats.

Atendiendo a una petición de los organizadores del Primer Encuentro Venezolano de Métodos de Cuantificación Morfológica, que se llevó a cabo en el Instituto de Ecología y Zoología Tropical de la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela en fecha 13 de Mayo de 2016, con el presente ensayo intento dar un vistazo breve, necesariamente imperfecto, del desarrollo de las técnicas de la Morfometría Geométrica (MG) en el país en los últimos años y advertir del riesgo de aplicación indebida de esta estupenda herramienta de análisis. Permitaseme, sin embargo, poner brevemente en contexto el desarrollo de lo que ahora conocemos como Morfometría Geométrica.

En un sentido amplio, la morfometría ha sido definida como el análisis cuantitativo, fundamentalmente estadístico, de la forma orgánica, la descripción de su variabilidad en grupos de organismos y la covariación de la forma orgánica con otras variables, tanto biológicas como ambientales. Sin embargo, a pesar de la abundancia y amplio espectro de estudios morfométricos que encontramos en la literatura actual, los intentos por encontrar una expresión realista, cuantificable, de la forma biológica no son nuevos. En el siglo XVI el artista alemán Albrecht Dürer (1471-1528), quien es considerado uno de los primeros en utilizar técnicas geométricas de visualización en su trabajo, recurría a la observación de un objeto desde un punto fijo, a través de una cuadrícula, tal como se ilustra en la Figura 1. Mediante esta técnica, reproduciendo cada punto del objeto en el punto correspondiente de la cuadrícula, fue capaz de dibujar figuras distorsionadas con perspectiva, más representativas del objeto real.



**Figura 1.** Esquema del método de cuadrículas utilizado por Dürer para obtener perspectiva en sus modelos.

Thompson fue precursor en enfatizar la necesidad de representar la configuración física de los organismos como objetos matemáticos, para lo cual recurrió al expediente de utilizar coordenadas cartesianas para estudiar las deformaciones de las formas de los organismos. En la Figura 2, Thompson representa los cambios que ocurren al pasar de la forma de una figura de una especie de pez a otra especie; no obstante su profundo impacto visual, sabemos ahora que estas representaciones, dibujadas a mano alzada, carecían de una base biológica firme, pues los puntos correspondientes en cada cuadrícula no se corresponden con estructuras anatómicas iguales por descendencia en las dos especies, lo que conocemos como homologías.

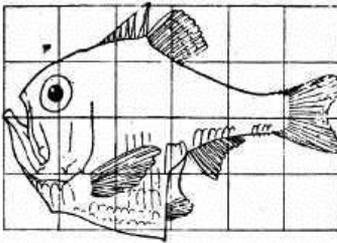


Fig. 517. *Argyropelecus Olfersi*.

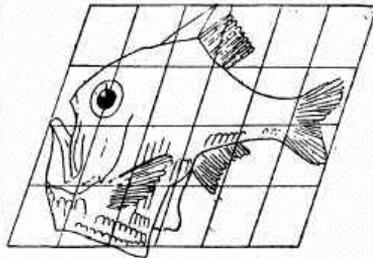


Fig. 518. *Sternoptyx diaphana*.

**Figura 2.** Cuadrículas de coordenadas cartesianas utilizado por D'arcy Thompson.

Intentos posteriores de los investigadores se concentraron en identificar aquellas variables que mejor pudieran expresar de una manera cuantitativa las características externas de la forma de los organismos. Con el avance de las aplicaciones estadísticas para la caracterización y cuantificación de la forma, numerosos autores utilizaron técnicas de análisis uni o bidimensional de medidas lineales entre estructuras definidas del cuerpo de los organismos, proporciones o cocientes entre medidas lineales, ángulos entre estructuras, correlaciones entre dos o más variables (Atchley *y col.*, 1976; Atchley y Anderson, 1978). Posteriormente, la utilización de múltiples variables tomadas en conjunto por autores como Galton, Hopkings, Teissier, Jolicoeur y Mossiman, Hopkins, Blackith y Reyment, Spearman y otros, utilizando análisis estadísticos factoriales, mayormente análisis de componentes principales, proporcionaron un gran impulso a la cuantificación de la forma de los organismos.

Anteriormente a los años 80 del siglo pasado, estas técnicas conformaron el grueso de los análisis de las mediciones de la forma biológica, integrando lo que se llamó Morfometría Multivariada o Multivariante, pero lejos aún de una descripción holística de la forma biológica y sus cambios intra o

interespecificos. Este gran cambio en el estudio y cuantificación de la forma de los organismos se produjo con el desarrollo en los años 80 del siglo XX de las herramientas computacionales y matemáticas que permitieron a Kendall, Bookstein, Rohlf, Marcus, Blackith y Reyment, Strauss, entre otros, darle viabilidad a la visualización y posterior cuantificación de la forma de los organismos planteado por D'arcy Thompson, 60 años anteriormente, e iniciar lo que conocemos actualmente como Morfometría Geométrica. El desarrollo de esta disciplina en el tiempo puede ser consultado más detalladamente a través de una serie de publicaciones y simposios, ya clásicos, conocidos como Libro Rojo (Bookstein *y col.*, 1985), Libro Azul (Rohlf y Bookstein, 1990), Libro Naranja (Bookstein, 1991), Libro Negro (Marcus, Bello y García-Valdecasas, 1993), Libro Amarillo (2013, un simposio en Italia, en el Journal Italiano de Mastozoología), Libro Blanco (Simposio en Italia en 1993, publicado en 1996), Libro Verde (Zelditch *y col.*, 2004), Dryden y Mardia (1998), y Cardini y Loy (2013), entre otros trabajos. Explicaciones sencillas y muy bien documentadas de la disciplina de la Morfometría Geométrica pueden y encontrarse también en publicaciones de Bookstein, Rohlf y Marcus, Slice y Mitteroecker y Gunz.

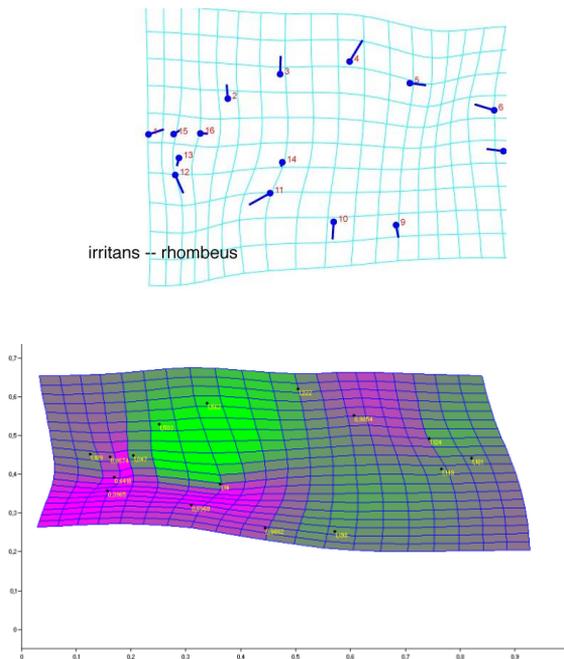
En la década de los años 70 del siglo XX, las herramientas estadísticas para el análisis de la forma no solo estaban desarrollándose, sino que las limitaciones de los instrumentos de cómputo dificultaban el análisis de grandes cantidades de datos y variables. Además de los análisis uni y bivariados comúnmente aplicados a datos morfológicos, la herramienta más común de análisis de datos morfológicos multivariados era el análisis de componentes principales, herramienta mayormente utilizada por los ecólogos. El análisis de componentes principales no constituía un modelo sujeto a comprobación (o falsificación, *sensu* Popper) y sólo fue posible incorporarlo como una análisis robusto con el desarrollo de técnicas de replicación con reemplazos (*bootstrap* o *jackknifing*), con las cuales fue posible asignar límites confidenciales a los resultados del análisis de componentes principales y obtener así estimados más robustos de los cambios en la forma. Puede decirse que el estándar de morfometría cuantitativa para estos años se resumía en un análisis de componentes principales de las distancias entre estructuras identificadas en la forma de los organismos. Una ventaja de los estudios morfológicos cuantitativos, en el caso particular de los peces, es que las variables a estudiar en ellos ya contaban con una estandarización de medidas propuesta por los ictiólogos Hubbs y Lagler a mediados del siglo XX, lo cual normalizó las variables morfológicas externas a analizar a lo largo de un gran espectro de grupos de peces y que han permanecido relativamente inalteradas hasta la fecha. De igual importancia, con el correr del tiempo, ha sido el hecho que dichas distancias están situadas en estructuras que ahora identificamos como hitos homólogos Tipo I, con la consecuente ventaja de poder comparar tales estructuras en y entre especies de distintos grupos monofiléticos.

En Venezuela, hasta donde podemos confirmar, el primer curso de Morfometría Geométrica moderno fue dictado en Instituto de Zoología Tropical (actual IZET) en 1986, por el Dr. Barry Chernoff, uno de los coautores del Libro Rojo mencionado anteriormente. Chernoff, para ese entonces investigador del Field Museum en Chicago, USA, ictiólogo que había estado en la vanguardia de los desarrollos de la Morfometría Geométrica, por muchos años había estado relacionado estrechamente con el los investigadores del Laboratorio de Ictiología del IZT, participando en trabajos de campo e investigación y por lo tanto fue una elección casi obvia para el desarrollo de un curso en esta disciplina. Entonces, lejanos todavía estaban los días de los paquetes computacionales para la obtención de coordenadas cartesianas de hitos homólogos, las cámaras de alta definición y escáneres 3D, por lo que utilizando equipos de computación y cámaras digitales básicas, este primer curso utilizó papel cuadrulado para graficar hitos homólogos Tipo I (*landmarks*) y plantillas de círculos para la determinación de ejes mediales en estructuras homólogas. La terminología actual para estos últimos es hitos pseudohomólogos o hitos Tipo II (*pseudolandmarks*), que son construcciones matemáticas, determinados en curvatura máximas de las formas. La técnica más utilizada para ese entonces era el denominado método de las cerchas (*Truss Network*), la cual permitía, y aún lo hace, identificar en los análisis las variables que determinan los cambios en la forma. Asimilados los rudimentos de la Morfometría Geométrica y con la colaboración internacional y nacional de investigadores interesados en estas nuevas técnicas, las técnicas de la Morfometría Geométrica se han enseñado en el Postgrado de Zoología de la Facultad de Ciencias de la UCV, en el curso Variación Morfológica y Especiación, que se ha dictado ininterrumpidamente desde entonces.

Al comparar la forma de los organismos el morfólogo describe las similitudes o diferencias entre ellos, punto por punto, carácter por carácter, admitiendo la existencia de correlaciones entre los caracteres, pero estando consciente de que los organismos son un todo integral, en donde es difícil separar de un todo sus diferentes, por lo que la manera como la morfología en general y la Morfometría Geométrica, en particular proceden a analizar caracteres, es una distinción artificial y metodológica. De allí que a este respecto es importante señalar que siempre ha sido el propósito cardinal de los profesores de este curso del Postgrado de Zoología de la UCV, que la Morfometría Geométrica sea considerada no como un fin en sí misma, sino como una herramienta para la cuantificación comparativa de la variación organismal.

La disciplina que conocemos como Morfometría Geométrica utiliza sofisticadas herramientas de obtención y manipulación de datos, elegantes programas computacionales e impactantes algoritmos de visualización de cambios de la forma (Figura 3), que pueden dar la impresión equivocada de infalibilidad a los que se aproximan a ella sin la necesaria formación teórica.

En especial, las denominadas deformaciones (*warps*), construcciones matemáticas elegantes, cuyos elementos son comúnmente interpretados como variables con contenido biológico. A este respecto, y en referencia al subtítulo de este ensayo, varios autores desde finales de los años 90 del siglo pasado han asentado que en estas construcciones subyace un problema teórico fundamental, pues la definición de estas deformaciones es arbitraria, sin base en los patrones de covariación de las variables en la data y, lo que es más problemático, pueden que no representen estructuras homólogas en los organismos o pueden no tener relevancia biológica alguna. Adicionalmente, apuntan varios autores, el espacio de la forma es curvo y multidimensional y no susceptible al análisis por los métodos estadísticos convencionales.



**Figura 3.** Ejemplos de visualización de datos mediante la utilización del programa Past (cita) para obtener cuadrículas de deformación *a la Thompson*.

Rolf y Bookstein (1990), resumen algunos de los problemas teóricos que resultan del uso de las deformaciones parciales (*partial warps* o *PW*) como expresión de los caracteres biológicos, especialmente en los estudios que pretenden utilizar estas construcciones como caracteres para el estudio filogenético: Las deformaciones parciales (*PW*) son construcciones

matemáticas arbitrarias, sin significado biológico, donde la escogencia de la referencia condiciona el estudio; las *PW* son altamente correlacionados entre sí y no cumplen con la propiedad no conmutativa de las transformaciones en el espacio de Kendall; de allí que el cambio de forma resultado de un cambio en una variable específica depende de los valores de otras variables, en otras palabras, un cambio de la variable de forma A, seguida por el cambio del valor de una variable de forma B, no proporciona el mismo resultado de forma que si el cambio es de la variable B seguida de la variable A. Zelditch *et al.* (2004) concurren con las principales objeciones mencionadas, comentando que las deformaciones parciales, no pueden y no deben ser utilizadas como variables para el estudio de la filogenia de los grupos. Un análisis que permite una visión más explicativa de esta complejo tema y que debe sentar la pauta para la correcta aproximación a esta fascinante disciplina, puede encontrarse en el reciente trabajo de Bookstein (2016): *The inappropriate symmetries of multivariate statistical analysis in geometric morphometrics*.

## AGRADECIMIENTOS

Quiero congratular a los organizadores de este Primer Encuentro Venezolano de Métodos de Cuantificación Morfológica por la realización de este evento que nos permitió a conocer investigaciones recientes en la disciplina de la Morfometría Geométrica, realizada mayormente por investigadores jóvenes, y agradecer la gentileza de Marcos Manzanares por haberme hecho partícipe del mismo.

## LITERATURA CITADA

- Atchley W.R., Gaskins, C.T. y D. Anderson. 1976. Statistical properties of ratios. I. Empirical results. *Syst. Zool.* 25:137-148.
- Atchley W.R. y D. Anderson. 1978. Ratios and statistical analysis of biological data. *Syst. Zool.* 25:71-78.
- Blackith, R.E. y R.A. Reyment. 1971. *Multivariate morphometrics*. Academic Press.
- Bookstein F. L. 1982. Foundations of morphometrics. *Annual Review of Ecology and Systematics* 13:451-470.
- Bookstein, F., B. Chernoff, R. Elder; J. Humpries, G. Smith, R. Strauss. 1985. *Morphometrics in Evolutionary Biology*. Special Publication 15. The Academy of Natural Science of Philadelphia, 277 pp.
- Bookstein F.L. 1989. Principal warps: thin-plate splines and the decomposition of deformations. *IEEE Trans. Pattern. Anal. Mach. Intel.* 11:567-585.
- Bookstein, F.L. 1991. Morphometric tools for landmark data. *Geometry and Biology*. Cambridge University Press: New York.
- Bookstein, F.L. 1998. A hundred years of morphometrics. *Acta Zoologica Academiae Scientiarum Hungaricae* 44(1-2):7-59.
- Bookstein, F.L. 2016. The Inappropriate symmetries of multivariate statistical analysis in geometric morphometrics. *Evolutionary Biology* 43(3):277-313.

- Cardini, A. y A. Loy. 2013. Virtual morphology and evolutionary morphometrics in the new millenium. *HYSTRIX, The Italian Journal of Mammalogy* .Vol. 24(1):140 pp.
- Dryden, I.L. y K.V. Mardia. 1998. *Statistical shape analysis*. Wiley: New York. 347 pp.
- Galton, F. 1888. Co-relations and their measurement, chiefly from anthropometric data. *Proceed. Royal Soc.* 45:135-145.
- Hopkins, J.W. 1966. Some considerations in multivariate allometry. *Biometrics* 22: 747-760.
- Hubbs, C.L.; K.F. Lagler. 1947. Fishes of the Great Lakes Region. *Cranbrook Inst. Sci., Bull. No. 26*, 186 pp.
- Jolicoeur, P. y J.E. Mossiman. 1960. Size and shape variation in the painted turtle, a principal component analysis. *Growth* 24:339-354.
- Kendall, D. 1981. The statistics of shape. En: *Interpreting multivariate data* (Barnett, V., Ed.) New York: Wiley, pp. 75-80.
- Marcus, L.F. 1990. Traditional morphometrics. En: *Proceedings Michigan Morphometrics Workshop* (Rohlf, F. J. y F. L. Bookstein, Eds.) Ann Arbor, Michigan: Univ. Michigan Museum, pp. 77-122.
- Marcus, L.F., E. Bello y A. García-Valdecasas (Eds.). 1993. Contributions to morphometrics. Museo Nacional de Ciencias Naturales Monografías: Madrid.
- Mitteroecker, P. y P. Gunz. 2009. Advances in geometric morphometrics. *Evol. Biol.* 36 (2):235-247.
- Popper, K.R. 1959. The logic of scientific discovery. Harper Torchbooks.
- Rohlf, F.J. 1990. Rotational fit (Procrustes) methods. En: *Proceedings of the Michigan Morphometrics Workshop* (Rohlf F.J. y F.L. Bookstein, Eds.). The University of Michigan Museum of Zoology, Ann Arbor. Pp: 227-236.
- Rohlf, F.J. and F.L. Bookstein (Eds.). 1990. *Proceedings of the Michigan morphometrics workshop*. Special Publication No. 2, University of Michigan Museum of Zoology: Ann Arbor.
- Rohlf F.J. y D.E. Slice 1990. Extensions of the Procrustes method for the optimal superimposition of landmarks. *Syst. Zool.* 39:40-59.
- Rohlf, F.J. y L.F. Marcus. 1993. A revolution in morphometrics. *Trend in Ecology and Evolution* 8(4):129-132.
- Rohlf, F.J. 2002. Geometric morphometrics and phylogeny. En: *Morphology, Shape and Phylogeny* (MacLeod, N. y P.L. Forey, Eds.) Taylor and Francis, London, pp: 175-193.
- Slice, D.E. 2005. Modern morphometrics. En: *Modern morphometrics in physical anthropology* (D.E. Slice, Ed.) New York: Kluwer Press. Pp. 1-45.
- Spearman, C. 1904. General intelligence objectively determined and measured. *Am. J. Psychol.* 15:201-239.
- Strauss, R.E. y F.L. Bookstein. 1982. The truss: body form reconstruction in morphometrics. *Syst. Zool.* 31:113-135.
- Teissier, G. 1938. Un essai d'analyse factoriel. Les variants sexuels de *Maia squinada*. *Biotypologie* 7:73-96.
- Thompson, D.A.W. 1915. Morphology and mathematics. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh* 50:857-895.
- Thompson, D.A.W. 1917. On growth and form. Cambridge: Cambridge University Press.
- Zelditch, M.L., D.L. Swiderski, H.D. Sheets, y W.L. Fink. 2004. *Geometric morphometrics for biologists: A primer*. Elsevier Academic Press. 443 pp.