

Morfometría geométrica: el estudio de la forma y su aplicación en biología

Introducción

Uno de los estudios más importantes que se ha llevado a cabo desde los inicios de la biología, es la descripción anatómica y morfológica de los seres vivos con la finalidad de analizar diferencias entre especies y dentro de una misma especie (Adams, Rohlf, Slice, 2013). Inicialmente, las descripciones de la forma de un organismo completo o de alguna de sus partes se hacían cualitativamente (Zeldicht, Swiderski, Sheets, Fink, 2004), es decir, se comparaban con alguna forma fácilmente reconocible, usando términos como en forma de círculo, forma alargada, fusiforme, entre otros.

A inicios del siglo XX ocurrió una transición en la biología, cambiando de estudios descriptivos a una ciencia más cuantitativa (Adams, Rohlf, Slice, 2004), lo que resultó en el desarrollo de la morfometría, que es “el estudio cuantitativo de la variación de las formas biológicas” (Bookstein, 1996). En sus orígenes, la morfometría utilizaba variables lineales como medidas, distancias, ángulos o proporciones; a partir de estas medidas, se obtenía un conjunto de datos que se analizaban por métodos estadísticos multivariados. Los resultados se expresaban como un conjunto de coeficientes y gráficas a través de los cuales las variaciones de tamaño y forma eran difíciles de interpretar, a este enfoque se le llama actualmente morfometría tradicional (Rohlf y Marcus, 1993; Zeldicht et al., 2004).

Debido a las dificultades y limitaciones de la morfometría tradicional, a finales del siglo XX surgió la morfometría geométrica, que ha sido descrita como

“una fusión empírica de la geometría con la biología” (Bookstein, 1982), ya que analiza la forma de los organismos o de alguna de sus estructuras, considerando el espacio geométrico y empleando métodos estadísticos multivariados.

En los siguientes párrafos se darán a conocer algunos conceptos centrales de la morfometría geométrica que la distinguen de la morfometría tradicional, así como las técnicas que utiliza y sus aplicaciones en biología, para incrementar el interés en este tipo de estudios.

Elementos básicos en morfometría geométrica

Uno de los conceptos fundamentales en morfometría geométrica es de la *forma*, que es una propiedad geométrica de un objeto y que no toma en cuenta la escala, rotación y traslación (Kendall, 1977; Bookstein, 1996) (Fig. 1).

Aunque el concepto de forma señala que esta propiedad geométrica no varía por efecto del tamaño, en morfometría geométrica, no ha sido posible analizar separadamente la “forma” del “tamaño”, debido a que son características biológicas que están íntimamente ligadas (Zeldicht et al., 2004), es decir, organismos de diferentes tamaños tendrán diferentes formas aunque sean de la misma especie, lo que se debe al desarrollo y crecimiento natural u ontogenético de los organismos vivos.

Este tipo de estudios, en los que se analiza los cambios en la forma con respecto al tamaño de los organismos a través de su ciclo de vida, se conocen

como “estudios de alometría” (Bookstein, 1986; Klingenberg, 2013).

Los estudios de morfometría geométrica utilizan dos fuentes de información para los análisis, uno es la homología biológica y el otro es la localización

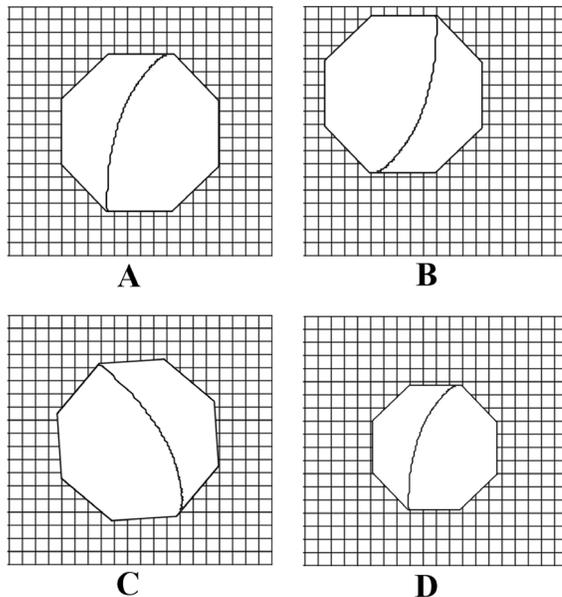


Figura 1. La forma de un objeto (A) no se ve afectada por la traslación (B) que se refiere a la ubicación o al plano de orientación del objeto, tampoco influye la rotación (C) ni la escala o tamaño del mismo (D).

geométrica. La homología biológica hace referencia a la correspondencia biológica de determinadas estructuras o partes entre individuos (Bookstein, 1986), mientras que la localización geométrica se refiere a la configuración espacial en dos o tres dimensiones de estas estructuras o partes (Klingenberg y Monteiro, 2005).

Para la localización de estas estructuras homólogas, en morfometría geométrica se utilizan principalmente dos variables: *outlines* (contornos) y los *landmarks*, que son loci anatómicos que no alteran su posición topológica relativamente a otros *landmarks*, proveen una cobertura adecuada de la forma y pueden ser ubicados fácil y repetidamente entre un organismo y otro (Zelditch et al. 2004). Bookstein (1991) estableció que existen tres tipos de landmarks: tipo I son yuxtaposiciones discretas de tejido, tipo II son zonas de máxima o mínima curvatura y tipo III son puntos extremos.

En ocasiones, las estructuras biológicas son superficies planas o lisas en las que es difícil establecer *landmarks* o éstos no cubren totalmente la forma a

analizar, para solucionar esta limitante, se utilizan puntos distribuidos uniformemente a lo largo de esta superficie, los cuales se conocen como *semilandmarks* (Bookstein, 1991) (Fig. 2).

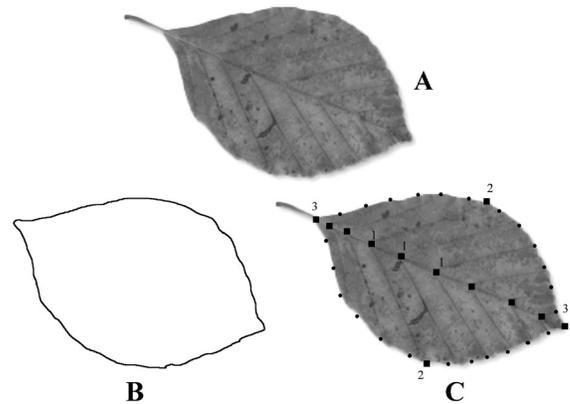


Figura 2. A partir de un objeto cuya forma es capturada en dos dimensiones (A), se puede proceder al análisis de la forma mediante su contorno (*outline*) (B), o mediante el uso *landmarks* (C). En una misma estructura pueden localizarse los tres tipos de *landmarks* (representados por cuadros): tipo I (cuadros número 1), tipo II (cuadros número 2) y tipo III (cuadros número 3); a su vez, pueden emplearse *semilandmarks* (representados como círculos).

Cómo se captura la forma en morfometría geométrica

Al analizar la forma de un organismo o de alguna de sus partes, el primer paso a realizar es que a partir de una imagen en dos o tres dimensiones, se capturen las coordenadas cartesianas expresadas como *landmarks*, *semilandmarks* o contornos.

Este ensayo hará referencia únicamente al análisis de la forma utilizando *landmarks*. Los landmarks, contienen información de la forma, tamaño, orientación y posición de los objetos, por lo cual no son adecuados para los análisis estadísticos de la forma (Mitteroecker, Gunz, Windhager, Schaefer, 2013). Para remover toda la información adicional, se utiliza un Análisis Generalizado de Procrustes (GPA abreviado en inglés) (Rohlf y Slice, 1990).

El método GPA o también conocido como superposición de Procrustes consiste, de manera general, en tres pasos (Klingenberg, 2010):

- 1) las configuraciones de los *landmarks* son escaladas a un mismo tamaño para remover el efecto de este factor,
- 2) se elimina el efecto de la posición y
- 3) las configuraciones de los *landmarks* se rotan para minimizar las desviaciones entre los *landmarks*

correspondientes; este método se describe con más detalle a continuación.

Superposición de Procrustes por mínimos cuadrados

El método de superposición de Procrustes minimiza las diferencias entre las configuraciones de *landmarks* basado en mínimos cuadrados, por lo que también se le conoce como *Generalized least square superimposition* o *GLS* en inglés (Schaefer y Bookstein, 2009), lo que se traduce como superposición generalizada de mínimos cuadrados.

El nombre de Procrustes proviene de la mitología griega: Procrusto ofrecía alojamiento a los viajeros solitarios quienes se convertían en sus víctimas, ya que los ataba a las cuatro esquinas de la cama y si la víctima era más grande que el tamaño de su cama les cortaba las partes que sobresalían de ésta, mientras que si la persona era más chica que el tamaño de la cama los estiraba hasta ajustarse al tamaño de ésta (Zeldicht *et al.*, 2004).

Como se mencionó previamente, la superposición de Procrustes se basa en tres pasos para remover toda la información no relacionada a la forma. La variación en el tamaño se elimina al ajustar cada configuración de landmarks de modo que tenga un tamaño de centroide igual a 1 (El tamaño del centroide, *centroid size* en inglés, es una medida de tamaño que cuantifica la extensión de los landmarks entorno a su centro de gravedad). La variación en la posición es removida mediante el desplazamiento de las configuraciones de manera que compartan la misma posición de su centro de gravedad. Por último las configuraciones se rotan hasta encontrar una orientación óptima para cada una de las configuraciones (Klingerberg 2013) (Fig. 3).

Lo que distingue este método es que el criterio en el que se basa es la minimización de las distancias Procrustes entre todas las configuraciones de landmarks. La distancia Procrustes es la raíz cuadrada de la suma de las distancias cuadradas entre las posiciones de los landmarks correspondientes. Este método es un ajuste por mínimos cuadrados que es iterativo: se alinean todas las configuraciones del conjunto de datos a una configuración particular, por ejemplo la primera configuración de landmarks, utilizando para ello el ajuste de Procrustes por mínimos cuadrados,

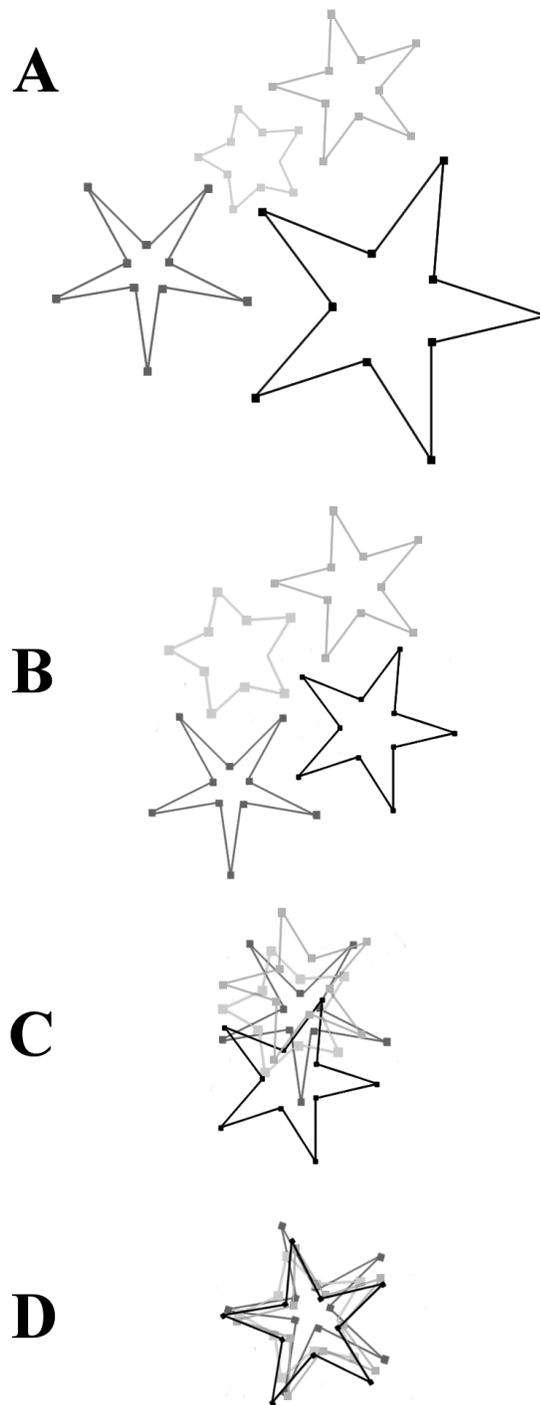


Figura 3. Representación generalizada de los pasos que incluye la superposición de Procrustes. (A) De las imágenes originales se digitalizan los landmarks correspondientes (cuadros). (B) La configuración de landmarks se escala al mismo tamaño del centroide. (C) Se remueven las diferencias por posición al trasladar las configuraciones de los landmarks a un mismo origen del sistema de coordenadas (D) Finalmente se rotan las configuraciones para que las diferencias en las posiciones de los landmarks correspondientes, sean minimizadas.

de tal manera que la suma de las distancias al cuadrado entre landmarks correspondientes (distancia Procrustes) entre cada configuración y la configuración de referencia sea mínima. En la siguiente iteración, esta nueva forma se utiliza como la nueva configuración de referencia y cada configuración se ajusta nuevamente. Una nueva forma promedio se calcula entonces, y el procedimiento se repite hasta que la forma promedio ya no cambie, lo cual generalmente ocurre después de usar tres iteraciones o unas cuantas más (Bookstein, 1991; Rohlf, 1990; Rohlf, 2002; Klingenberg 2013).

Este método de superposición ha sido utilizado desde hace muchos años (Sneath, 1967; Gower, 1975) y hoy en día es el método más empleado en morfometría geométrica (Zeldicht et al., 2004).

Analizando la forma en morfometría geométrica

Una vez que se ha realizado la superposición de Procrustes, se obtienen las coordenadas Procrustes de la forma, que son variables que únicamente contienen información de la forma de los organismos y que pueden ser utilizadas en diferentes análisis multivariados; también se obtiene la forma promedio de la estructura u organismo analizado. Dependiendo de los intereses u objetivos de la investigación, estas coordenadas se pueden utilizar en diferentes análisis estadísticos multivariados para comprobar diferentes hipótesis.

En morfometría geométrica es posible reconocer cambios y diferencias en la forma de los organismos o de sus partes; por ejemplo, se pueden analizar diferencias en la forma por dimorfismo sexual, es decir, diferencias en la forma entre machos y hembras; también se pueden conocer cambios en la forma considerando cambios ontogénicos asociados a la edad o al crecimiento (Klingenberg, 2013).

La diferencia más sobresaliente que tiene la morfometría geométrica en comparación con la morfometría tradicional, además del tipo de variables que utiliza, es que los resultados de los análisis multivariados pueden ser interpretados y visualizados directamente como deformaciones de la forma (Fig. 4).

Uno de los análisis multivariados rutinarios en morfometría geométrica es el Análisis de Componentes Principales (ACP), que es un método de ordenación que puede ser utilizado para examinar

la variación de los datos (Fig. 4). EL ACP se utiliza principalmente para reducir la dimensionalidad de los datos; una vez que se obtienen los componentes principales (CP), algunos de estos pueden ser utilizados como variables de la forma en los siguientes análisis multivariados (Slice 2007).

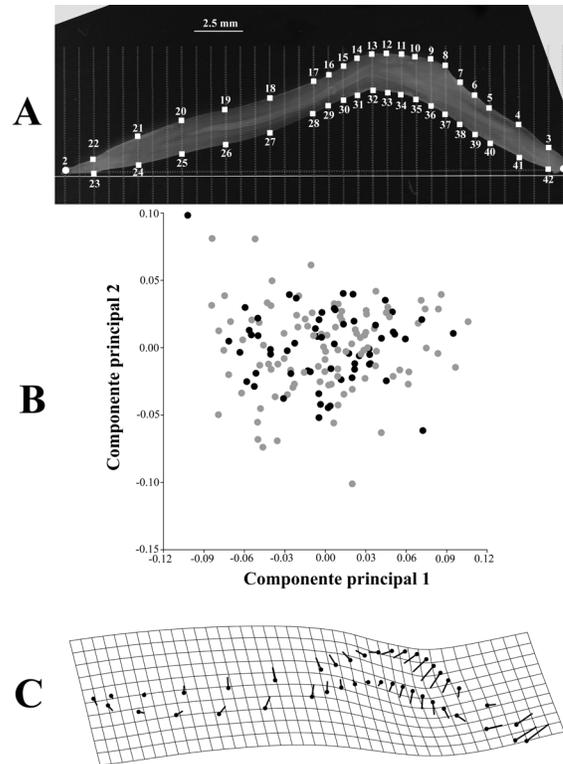


Figura 4. Análisis de la forma de los estiletos (concha vestigial) de *Octopus hubbsorum*. (A) Landmarks (círculos 1 y 2) y semilandmarks (cuadrados 3 a 42) localizados. (B) Gráfica de los primeros dos componentes principales que muestra la variación de los organismos utilizados clasificados por sexo, puntos negros = hembras, puntos grises = machos. (C) La gradilla o placa de deformación muestra los cambios en la forma según el CP1 (C), los círculos indican la forma promedio de la muestra, las flechas indican los cambios en la posición relativa de los landmarks conforme al incremento en los scores del CP1.

El análisis de variables canónicas (AVC) es otro de los análisis multivariados que encuentra transformaciones lineales de los datos para maximizar la separación entre los grupos, que pueden ser por ejemplo, diferentes especies, grupos de edad, sexo o cualquier otra categoría establecida *a priori* (Fig. 5). La regresión es otro método que también se utiliza en morfometría geométrica para explicar la variación de la forma con respecto a otra variable continua, como la temperatura, la ubicación geográfica en términos de latitud o longitud, la talla, el peso o la edad (Zeldicht et al. 2004).

La mayoría de los análisis multivariados que se utilizan en los estudios de morfometría tradicional también pueden ser empleados por la morfometría geométrica para analizar cuantitativamente las variaciones de la forma, por lo cual los métodos de morfometría geométrica son herramientas muy útiles cuyo uso va creciendo ampliamente en el estudio de formas biológicas.

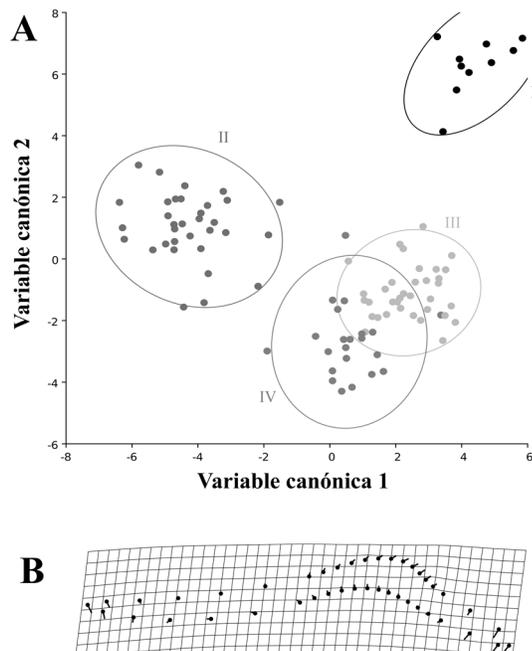


Figura 5. (A) Gráfica de dispersión del AVC de 100 estiletes del pulpo *Octopus hubbsorum*, todos los organismos son machos de diferentes estadios de madurez: círculos negros = estadio de madurez I (inmaduro), círculos azules = estadio de madurez II (en maduración), círculos rojos = estadio de madurez III (maduro), círculos verdes = estadio de madurez IV (Eyaculados). (B) Deformación de la forma promedio asociada a la variable canónica 1 para los cuatro estadios de madurez de los machos.

Aplicación de la morfometría geométrica en un caso de estudio (tomado de Drake y Klingenberg 2010)

En este trabajo los autores analizaron la diversificación a gran escala de los cráneos de 677 perros adultos domesticados de diferentes razas, 228 lobos grises adultos, 57 coyotes, 49 chacales dorados y otros ejemplares de diferentes animales carnívoros que representaban 122 géneros de este grupo; su objetivo fue analizar si la domesticación cambiaba los patrones de integración y modularidad de los cráneos y la diversidad de los mismos. Los cráneos fueron obtenidos de diferentes colecciones de museos

y fotografiados para establecer un conjunto de 50 landmarks.

Con base en los resultados, los autores discuten que aunque los perros domesticados son una sola especie, con la separación de las razas debido a la intervención humana, se produce una disparidad morfológica que no es resultado por sí de la especiación natural. Esto concuerda con la variación en la forma de los cráneos, que fue mucho mayor en perros que en los lobos, coyotes, chacales y otros carnívoros analizados, esto resultó en que la disparidad (desigualdad o diferencia) en la forma del cráneo entre individuos y razas de perros fuera mucho mayor que en los lobos, coyotes y chacales. Hacer referencia a este trabajo es una forma de ejemplificar una de las muchas aplicaciones que tiene la morfometría geométrica para resolver preguntas biológicas, que puede incluir aspectos ecológicos, evolutivos, de función de desarrollo, entre muchos otros más.

Conclusiones

La morfometría se centra en el estudio de la variación del tamaño y la forma de los organismos o de alguna de sus estructuras. Debido a las variables que utiliza, la morfometría se divide en geométrica y tradicional. La mayoría de los estudios realizados en organismos han utilizado la morfometría tradicional; no obstante el uso de la morfometría geométrica ha ido incrementando en los últimos años.

Los análisis estadísticos en morfometría geométrica utilizan las coordenadas Procrustes de la forma, que conservan la geometría del organismo y son de los principales aspectos que la hace diferente de la morfometría tradicional, ya que ésta última emplea como variables conjuntos de medidas como distancias, proporciones y ángulos.

La ventaja de la morfometría geométrica es que no toma en cuenta más que la forma de la estructura o del organismo analizado; mientras que en la morfometría tradicional, pueden influir muchos factores en la toma de las medidas, y éstas pueden tener deficiencias en la representación de la forma de la estructura u organismo analizado.

En ambos enfoques se emplean métodos multivariados, pero los resultados de los análisis en morfometría geométrica pueden ser observados como

cambios de la forma utilizando placas de deformación, lo que hace que las interpretaciones sean más fáciles que los resultados de análisis de morfometría tradicional, los cuales solamente se expresan como tablas, coeficientes, matrices y gráficas de dispersión. Además, la morfometría geométrica se puede emplear en una amplia variedad de estudios, como cambios en la forma con enfoques ontogenéticos, diferencias en la forma entre sexos, entre especies, entre grupos con diferente distribución geográfica, estudios morfométricos con enfoques filogenéticos, entre muchos otros.

Por estas razones es importante que se promueva el interés en conocer estas técnicas que pueden hacer más cuantitativo el análisis de la forma de los organismos vivos completos, de sus partes, de fósiles, de huellas, entre muchas otras formas que nos interese analizar 

Bibliografía

- Adams, D.C., Rohlf, F.J., Slice, D.E. (2004). Geometric morphometrics: ten years of progress following the 'revolution'. *Italian Journal of Zoology*, Vol. 71(1). 5-16.
- Adams, D.C., Rohlf, J.F., Slice, D.E. (2013). A field comes of age: geometric morphometrics in the 21st century. *Hystrix, the Italian Journal of Mammalogy*. Vol. 24(1). 7-14.
- Bookstein, F.L. (1982). Foundations of morphometrics. *Annual Review of Ecology and Systematics*. Vol. 13. 451-470.
- Bookstein, F.L. (1986). Size and shape spaces for landmark data in two dimensions. *Statistical Science*. Vol. 1. 181-242.
- Bookstein, F.L. (1991). *Morphometric tools for landmark data: Geometry and Biology*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
- Bookstein, F.L. (1996). Biometrics, biomathematics and the morphometric synthesis. *Bulletin of Mathematical Biology*. Vol. 58(2), pp. 313-365.
- Drake, A.G., Klingenberg, C.P. (2010). Large-scale diversification of skull shape in domestic dogs: disparity and modularity. *The American Naturalist*. Vol. 175(3). 289-301.
- Gower, J. C. (1975). Generalized Procrustes analysis. *Psychometrika* Vol. 40. 33-51.
- Kendall, D.G. (1977). Diffusion of shape. *Advances in Applied Probability*. Vol. 9(3). 428-430.
- Klingenberg, C.P. (2010). Evolution and development of shape: integrating quantitative approaches. *Nature Reviews*. Vol. 11. 623-635.
- Klingenberg, C.P. (2013). Cranial integration and modularity: insights into evolution and development from morphometric data. *Hystrix, the Italian Journal of Mammalogy*. Vol. 24(1). 43-58.
- Klingenberg, C.P., Monteiro, L.R. (2005). Distances and directions in multidimensional shape spaces: implications for morphometric applications. *Systematic Biology*. Vol. 54. 678-688.
- Mitteroecker, P., Gunz, P., Windhager, S., Schaefer, K. (2013). A brief review of shape, form, and allometry in geometric morphometrics, with applications to human facial morphology. *Hystrix, the Italian Journal of Mammalogy*. Vol. 24(1). 59-66.
- Rohlf, F.J., Slice D.E. (1990). Extensions of the Procrustes method for the optimal superimposition of landmarks. *Systematic Zoology*. Vol. 39(1). 40-59.
- Rohlf, F.J., Marcus, L.F. (1993). A revolution morphometrics. *Trends in Ecology & Evolution*, Vol. 8(4). 129-132.
- Rohlf, F.J. (1990). Morphometrics. *Annual Review of Ecology and Systematics*, Vol. 21. 299-316.
- Rohlf, F.J. (2002). Geometric morphometrics and phylogeny. *Systematics Association Special Volume Series 64: Morphology, Shape and Phylogeny*. 175-193.
- Schaefer, K., Bookstein, F.L. (2009). Does geometric morphometrics serve the needs of plasticity research? *Journal of Bioscience* Vol. 34(4). 589-599
- Slice, D.E. (2007). Geometric morphometrics. *Annual Review of Anthropology*. Vol. 36. 261-281.
- Sneath, P.H.A. (1967) Trend-surface analysis of transformation grids. *Journal of Zoology*, Vol. 151. 65-122.

Zelditch, M.L., Swiderski, D.L., Sheets, H.D. (2004).
Geometric morphometrics for biologists: A
primer. San Diego, California, USA: Elsevier
Academic Press.

Alejandra López Galán
Universidad del Mar, Campus Puerto Ángel