

Líneas de Estasis Centroidal (LEC): una hipótesis empírica con alto contenido teórico, para evaluar formas animales

Centroidal stasis lines (SCL): An empirical hypotheses, with high theoretical content, to evaluate animal shapes

Juan Elías García-Pérez ^{1,2}

¹*Programa Ciencias del Agro y del Mar, UNELLEZ-Guanare, estado Portuguesa, Venezuela.*

²*Academia de Ciencias Agrícolas de Venezuela. Sector Quebrada Negra, municipio Alberto Arvelo Torrealba, estado Barinas, Venezuela.*

Correo-e: ecologia2unellez@gmail.com

(Recibido 16-09-2024 / Aceptado: 15-12-2024 / En línea: 31-12-2024)

RESUMEN

Las Líneas de Estasis Centroidal (LEC), son generadas al descomponer los centroides de coordenadas Procrustes, en sus componentes (X, Y), y graficar cada punto en un plano, donde se agrupan en una línea recta, con pendiente negativa y alto coeficiente de correlación. Fueron descubiertas empíricamente, pero por su altísimo coeficiente de correlación, se pensó que podían ser importantes en la discriminación de taxa a nivel específico, o supraespecífico. En este trabajo, se realiza un análisis del contenido teórico y empírico de ellas, a través de varias evidencias directas e indirectas, sobre varios tipos de evidencias, sobre animales, y al final se trabaja sobre figuras geométricas. Todos los experimentos, fueron contrastados con centroides generados artificialmente a partir de pseudorréplicas producidas con el promedio, desviación estándar y distribución probabilística de los datos originales, posteriormente aleatorizados. Ocho pruebas realizadas, a otras tantas estructuras, biológicas y artificiales, muestran que los centroides originales siempre producen LECs, con pendiente negativa y alto coeficiente de correlación, mientras que los creados aleatoriamente, presentan muy bajo coeficiente de correlación, estadísticamente no significativo, y una pendiente que no difiere significativamente de cero. La comparación entre estas LECs, Luego de ser aplicada a distintos tipos de estructuras, tanto naturales, como figuras geométricas, se concluye que las LECs, aparecen como una expresión del orden interno, y las regularidades que presentan los hitos en su configuración, y que, además, muestran las tres propiedades principales usadas para evaluar una teoría científica, como son fundamentación teórica, aplicabilidad y universalidad.

Palabras clave: centroides, morfometría geométrica, variables procrustes, taxonomía, teoría científica.

ABSTRACT

The Centroidal Stasis Lines (LEC) are generated by decomposing the centroids of Procrustes coordinates, into their components (X, Y), and plotting each point on a plane, where they are grouped in a straight line, with a negative slope and high correlation coefficient. They were discovered empirically, but due to their very high correlation coefficient, it was thought that they could be important in the discrimination of taxa at the specific or supraspecific level. In this work, an analysis of the theoretical and empirical content of them is carried out, through various direct and indirect evidences, on various types of evidence, on animals, and on geometric figures. All experiments were contrasted with centroids artificially generated from pseudoreplicates produced with the mean, standard deviation and probabilistic distribution of the real data, later randomized. Eight tests carried out, on as many structures, biological and artificial, show that the real centroids always produce LECs, with a negative slope and a high correlation coefficient, while those created randomly, have a very low correlation coefficient, statistically not significant, and a slope that does not differ significantly from zero. The com-

parison between these LECs, After being applied to different types of structures, both natural and geometric figures, it is concluded that the LECs appear as an expression of the internal order, and the regularities that the landmarks present in their configuration, and that, in addition, they show the three main properties used to evaluate a scientific theory, such as theoretical foundation, applicability and universality.

Keywords: centroids, geometric morphometrics, procrustes variables, scientific theory, taxonomy.

INTRODUCCIÓN

La morfometría geométrica puede definirse como el análisis estadístico de la variación de las formas mediante la utilización de coordenadas cartesianas, tomadas sobre hitos anatómicos (Bookstein 1991, Zelditch *et al.* 2008). El llamado paradigma de Procrustes, un enfoque surgido de la unión del campo de la estadística de las formas, y métodos analíticos de superposición de hitos, produjo mejoras apreciables en los estudios de morfometría geométrica, y es, actualmente, el método estándar de análisis estadístico de las formas (Adams *et al.* 2013).

Dentro de este paradigma, fue propuesto, recientemente, el concepto de Línea de Estasis Centroidal, o LEC (García-Pérez 2021), como una hipótesis que establece, para cada especie, o grupos de especies relacionadas, la formación de una bien definida, además de particular, línea recta de regresión, con un muy alto coeficiente de correlación, que se forma al graficar, las variables Procrustes, de cada individuo, dentro de un grupo de interés, expresadas en un único punto, representado por el par cartesiano (X,Y), que se obtiene a partir de la raíz cuadrada de la suma de todas las variables x elevadas al cuadrado, por una parte, para constituir el componente X del par, luego, aplicando el mismo procedimiento, para las variables y , se obtiene el componente Y.

Al graficar los diferentes puntos (X, Y), que representan a los distintos individuos, éstos se agrupan alrededor de una línea recta con pendiente negativa, e intercepto positivo, que se hipotetiza, como única para individuos de cada especie, o especies relacionadas, en donde los parámetros de cada recta o LEC, dependerán del número y posición de los hitos seleccionados, y de la configuración particular de éstos para cada taxón analizado. Por tanto, cualquier comparación debe ser realizada en base al mismo número de hitos y similar posición homológica para cada individuo. Estas líneas rectas, pueden ser muy conservativas a la hora de ser comparadas entre diferentes especies o grupos de ellas, así, por ejemplo, en el caso de *Mikrogeophagus rami-rezi* (G. S. Myers & Harris, 1948) (Pisces, Perciformes, Cichlidae), el análisis morfométrico reveló, cinco poblaciones muy bien discriminadas, mientras la LEC, no mostró ninguna diferencia, y todos los puntos quedaron alineados

en una misma recta con un coeficiente de determinación R^2 de 99.5% (García-Pérez 2021).

Esta hipótesis, inductivamente inferida, puede ser una herramienta importante para lograr identificar taxones a nivel específico, o supraespecífico, y también modificaciones evolutivas expresadas en la variación de componentes de la forma. Sin embargo, necesita ser sometida a varias pruebas para verificar su rigurosidad científica y alcances. En el presente trabajo se intenta realizar una serie de exámenes para caracterizar la hipótesis y explorar su contenido teórico y empírico, y así validarla científicamente, y poder aplicarla, como apoyo de los análisis morfométricos, en la discriminación o determinación de singularidades taxonómicas y modificaciones evolutivas.

Para ello, se realizó un análisis donde se consideraron las características teóricas y empíricas de la mencionada hipótesis, en función de la metodología presentada por Pickett *et al.* (2007); y para tener una idea más clara de la utilidad de las LEC, se tomarán en consideración los criterios usados para evaluar términos científicos, que son significancia teórica, universalidad y aplicabilidad (Hull 1997: 365).

MATERIALES Y MÉTODOS

Contenido teórico de la hipótesis

Dominio

Esta hipótesis está enmarcada en el paradigma de Procrustes, dentro de la Morfometría Geométrica (Bookstein 1991). Los datos sobre las formas deben ser tomados sobre hitos homólogos, estructuras de forma similares, en poblaciones o especies relacionadas filogenéticamente (misma especie, mismo grupo de especies, y mismo sexo en caso de haber dimorfismo sexual en la forma). Estos hitos se deben corresponder también en número para todos los individuos analizados, para que todos los centroides puedan ser comparables.

Axiomas o premisas

Axioma 1: Se sabe que la suma de todas las variables elevadas al cuadrado, constituye el tamaño del centroide en conjuntos de variables morfométricas (Bookstein 1991). Partiendo de la premisa de que, al ser estas variables trans-

formadas a Procrustes, el valor del tamaño del centroide es 1 (Zelditch *et al.* 2004).

Axioma 2: Para todo individuo o forma definida, en el plano, por un número n de hitos homólogos, expresados en la forma de pares cartesianos (x,y) , que han sido transformados a variables Procrustes, existe un par (X,Y) , donde

$$\mathbf{X} = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \quad \text{y} \quad \mathbf{Y} = \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2}$$

Axioma 3: $X^2+Y^2=1$, el cual es el tamaño del Centroide, para variables morfométricas convertidas a Procrustes.

Axioma 4: Para todo grupo de individuos, al menos de similar edad y mismo sexo, perteneciente a una especie, o especies relacionadas, y en los que se puedan obtener un grupo de hitos inambiguamente homólogos, existe una ecuación: $Y=b-mX$, en la cual se alinean los puntos del par (X,Y) , que representan a cada individuo, formando una línea recta, de pendiente negativa e intercepto positivo, con un muy elevado coeficiente de correlación, que va a caracterizar, con una pendiente e intercepto particulares, para cada conjunto de hitos seleccionados, a los individuos de esa especie, o grupo de especies emparentadas.

Teoremas

Teorema 1: Como $X^2+Y^2=1$, siempre se cumplirá que mientras X aumente, Y va a disminuir, por tanto, la pendiente será negativa. Como los valores están en el primer cuadrante, el intercepto será positivo, por tanto, serán $b>0$ y $m<0$.

Teorema 2: Si $Y=m*X+b$, entonces $Y^2= m^2*X^2+ 2*m*b*X +b^2$, sustituyendo en la ecuación 1, se tiene que $X^2+ m^2*X^2+ 2*m*b*X +b^2=1$; lo que genera una ecuación

cuadrática de la forma $(1+ m^2)*X^2+ 2*m*b*X + b^2-1=0$, en la cual la solución indica dos valores que constituyen el ámbito de las X , donde se cumple la doble condición, expresada en los axiomas 2 y 3, que $X^2+Y^2=1$, y de pertenecer a la recta $Y=m*X+b$; sustituyendo en esta última ecuación, se obtienen los valores de Y , que faltan para constituir los dos pares cartesianos entre los cuales se cumplen ambas premisas.

Teorema 3: La línea recta que forma la LEC es subtangencial al arco de radio = 1, que se genera en el punto de origen $(0,0)$, y que cubre el segundo octante, en el primer cuadrante (Fig. 1), entre los puntos $(\frac{\sqrt{2}}{2}, \frac{\sqrt{2}}{2})$ y $(1,0)$.

Contenido empírico de la hipótesis

Hechos

Por una serendipia, se descubrió, que al graficar los componentes cartesianos (X,Y) , de los centroides individuales de 83 peces de la especie *Mikrogeophagus ramirezi*, pertenecientes a cinco poblaciones morfométricamente diferenciadas, se obtuvo una recta de regresión con un $R^2= 0.995$ (García-Pérez 2021). Esta recta, dada la altísima correlación entre ambas variables, una $F= 15384.27$, llevó al razonamiento inductivo de que podía ser importante en la caracterización de taxones a nivel específico y supraespecífico (García-Pérez 2021).

Generalizaciones confirmadas

Pickett *et al.* (2007) señalan tres aspectos a tomar en cuenta para la confirmación de una teoría:

- a. El grado de Concordancia entre lo Predicho y lo Observado que, en este caso vendría dado por el muy alto coeficiente de correlación, para la LEC, y la pen-



Figura 1. Localización de los hitos, en *Prochilodus mariae* Eigenmann, 1922 (Pisces, Characiformes, Prochilodontidae), para evaluar formas corporales.

- diente siempre negativa, y el intercepto con las abscisas, siempre positivo.
- La existencia de Apoyo Independiente a las Premisas, que puede ser obtenido al confrontarlas con las variables independientemente generadas, pero bajo su misma distribución de probabilidades, media y desviación estándar, excluyendo alguna correlación entre hitos, para mantener el completo azar.
 - La variedad de clases de evidencia, que serían las LEC, obtenidas para distintos grupos taxonómicos y diferentes hitos y estructuras, a los cuales se les graficaron los componentes (X, Y), y que también cumplirían con los apartados a y b.

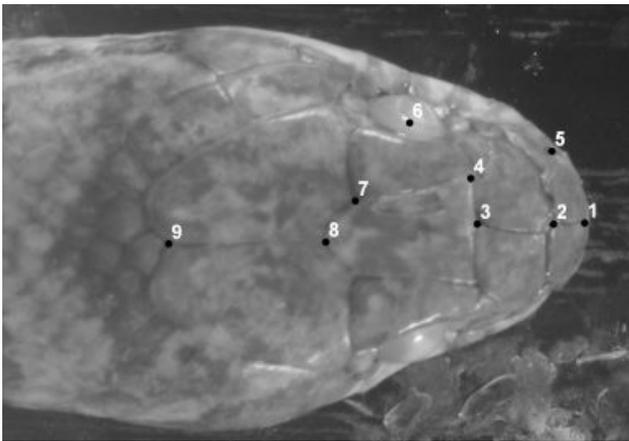


Figura 2. Localización de los hitos, en *Leptodeira* sp. (Reptilia, Squamata, Dipsadidae), para evaluar configuración de escamas.

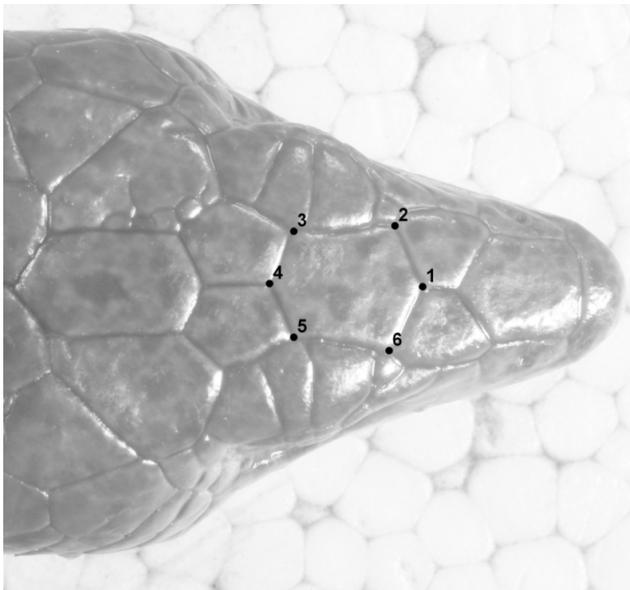


Figura 3. Localización de los hitos, en *Anadia* del complejo *brevifrontalis* (Reptilia, Squamata, Gymnophthalmidae), para evaluar la forma de la escama frontal en individuos de seis poblaciones de páramo y selva nublada.

Pruebas de falsación

Se trabajará con los ítems, contenidos dentro de las Generalizaciones Confirmadas, se incluirán distintas formas para realizar las contrastaciones con estructuras corporales en peces (Fig. 1), configuración de escamación en lagartos y serpientes (Fig. 2), formas de escamas en lagartos (Fig. 3), y formas geométricas obtenidas a través de plantillas (Fig. 4), lo cual mostrará evidencias de aplicabilidad y universalidad.

Se generaron pseudorréplicas, usando la metodología de García-Pérez (2021), para comparar las regresiones obtenidas de valores reales con las de valores simulados, para cada uno de los casos (Fig. 5). Una vez obtenidos estos valores, se procedió a calcular sus coeficientes de correlación, para establecer su significancia estadística, y el de regresión e intercepto, para obtener las ecuaciones de las rectas de los datos reales y simulados, y determinar si son estadísticamente diferentes.

Luego, se realizó una prueba exacta de Fischer, para establecer si el comportamiento de la suma de cada par de conjuntos de puntos reales y simulados, en cada experimento, tienen el mismo resultado predicho por la teoría.

RESULTADOS

Además de que para las formas corporales de *M. ramirezi*, al graficar las coordenadas. (X, Y) se observa una concordancia muy alta, a diferencia de los datos simulados, y una pendiente claramente negativa (García-Pérez, 2021, pp. 1220-21), donde se infirió la hipótesis, y posible importancia, de las LEC, en este caso, los resultados, para las diferentes pruebas (Tablas 1 y 2) no contradicen los axiomas y teoremas de la presente hipótesis.

Así, todas las pruebas generaron pendientes negativas, con alto coeficiente de correlación para los valores reales, mientras las rectas de todos los valores simulados presentaron pendientes con coeficientes de regresión, no significativamente diferentes de cero, y una correlación nula (Exacta de Fischer, $p = 0.0001$).

Una aplicación de la metodología, se realizó al comparar dos LEC (Fig. 6), para las especies, *Prochilodus mariae* y *P. rubrotaeniatus* (Pisces: Characiformes) definidas por las siguientes ecuaciones: $Y = -4.1791X + 4.2966$; $p < 0.0001$, y $Y = -3.4927X + 3.6323$; $p < 0.0001$, respectivamente, a las cuales se les sometió a una prueba de diferencia entre dos rectas de regresión, la cual fue altamente significativa, prueba $t = -4.1868$, $p < 0.001$, lo que muestra la utilidad y aplicabilidad de las LEC, para discriminar taxones con algún grado de diferenciación, en otros casos no es posible encontrar tales diferencias en especies muy emparentadas

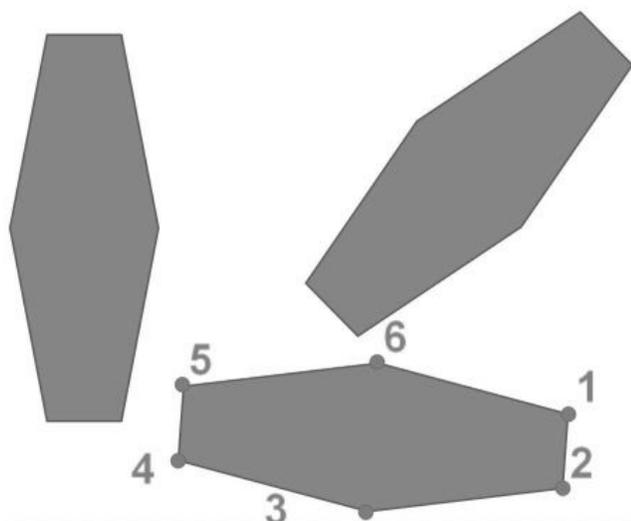


Figura 4. Localización de los hitos, un hexágono alto (comprimido lateralmente), para evaluar formas en figuras geométricas.

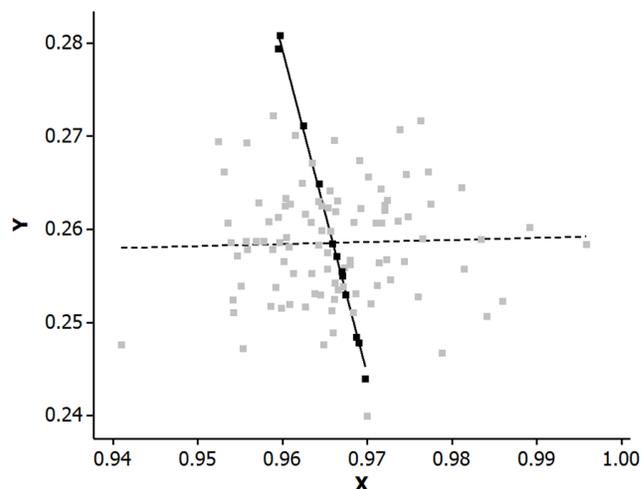


Figura 5. Gráfico de dispersión de las coordenadas X,Y de los valores reales y simulados para *Prochilodus rubrotaeniatus*. Puntos negros y línea continua, representan los valores reales que forman una LEC; cuadrados grises y línea punteada representan los valores simulados, con una recta de regresión no significativa y estadísticamente no diferente de cero.

Tabla 1. Comparación de las LEC con las rectas de regresión de los valores simulados, para cada ítem analizado.

Condición de los valores de ítem	Ecuación de la Recta	Coefficiente de Correlación	Significancia Estadística
<i>Prochilodus rubrotaeniatus</i> reales	$Y = -3.4927X + 3.6323$	$r = 0.9978$,	$p < 0.0001$; $n = 14$
<i>Prochilodus rubrotaeniatus</i> simulados	$Y = 0.0221X + 0.2372$	$r = 0.0312$	$p > 0.05$; $n = 99$
<i>Prochilodus mariae</i> reales	$Y = -4.1791X + 4.2966$	$r = 0.9940$	$p < 0.0001$; $n = 6$
<i>Prochilodus mariae</i> simulados	$Y = 0.0371X + 0.2086$	$r = 0.0534$	$p > 0.05$; $n = 99$
<i>Leptodeira</i> sp. reales	$Y = -3.1675X + 3.231$	$r = 0.9942$	$p < 0.0001$; $n = 11$
<i>Leptodeira</i> sp. simulados	$Y = -0.020X + 0.2750$	$r = 0.0321$	$p > 0.05$; $n = 99$
<i>Cnemidophorus arenivagus</i> reales	$Y = -3.3259X + 3.4725$	$r = 0.9981$	$p < 0.0001$; $n = 8$
<i>Cnemidophorus arenivagus</i> simulados	$Y = 0.1118X + 0.1691$	$r = 0.1036$	$p > 0.05$; $n = 100$
<i>Cnemidophorus spendidus</i> reales	$Y = -3.5122X + 3.6506$	$r = 0.9946$	$p < 0.0001$; $n = 6$
<i>Cnemidophorus spendidus</i> simulados	$Y = 0.2008X + 0.0675$	$r = 0.1716$	$p > 0.05$; $n = 100$
<i>Anadia</i> del complejo <i>brevifrontalis</i> reales	$Y = -1.1764X + 1.5426$	$r = 0.9945$	$p < 0.0001$; $n = 6$
<i>Anadia</i> del complejo <i>brevifrontalis</i> simulados	$Y = 0.0415X + 0.6115$	$r = 0.0406$	$p > 0.05$; $n = 52$
Hexágonos equiláteros reales	$Y = -0.9939X + 1.4097$	$r = 0.9996$	$p < 0.0001$; $n = 6$
Hexágonos equiláteros simulados	$Y = 0.1443X + 0.6036$	$r = 0.1191$	$p > 0.05$; $n = 99$
Hexágonos altos reales	$Y = -2.9891X + 3.1519$	$r = 0.9999$	$p < 0.0001$; $n = 5$
Hexágonos altos simulados	$Y = -0.0667X + 0.3806$	$r = 0.0903$	$p > 0.05$; $n = 99$

Tabla 2. Comparación entre las rectas de valores reales vs simulados para cada ítem.

Item	Significancia estadística
<i>Prochilodus rubrotaeniatus</i>	$p < 0.0001$; $n = 113$
<i>Prochilodus mariae</i>	$p < 0.0001$; $n = 105$
<i>Leptodeira spp.</i>	$p < 0.0001$; $n = 110$
<i>Cnemidophorus arenivagus</i>	$p < 0.0001$; $n = 108$
<i>Cnemidophorus spendidus</i>	$p < 0.0001$; $n = 106$
<i>Anadia</i> del complejo <i>brevifrontalis</i>	$p < 0.001$; $n = 58$
Hexágonos equiláteros	$p < 0.0001$; $n = 105$
Hexágonos altos	$p < 0.0001$; $n = 104$

(García-Pérez 2021). Dada la robustez del método, éste puede servir para falsear hipótesis de agrupamientos de taxones supraespecíficos, tales como grupos de especies y géneros, de una manera objetiva.

CONCLUSIONES

Una estructura repetitiva, a través de los hitos, genera las LEC, las diferencias entre LECs, vienen dadas por diferencias significativas en las formas, que podrán ser contrastadas sólo si ellas son tomadas a partir del mismo ordenamiento de los hitos, o modelo de ellos. Es una regularidad de la naturaleza, con lo cual el razonamiento inductivo es garantizado, dentro del dominio de la geometría euclidiana (Diez & Moulines 1997: 407).

Se puede decir, que las LEC, son una propiedad de la forma, y trascienden las estructuras biológicas, hasta llegar a las geométricas, puesto que no hay diferencias en los patrones de resultados obtenidos a partir de ambos tipos de datos.

Se pudo observar que la hipótesis de las LEC, presenta una aplicabilidad sobre formas y estructuras de diferentes orígenes, además como actúa sobre estructuras biológicas de distinta índole, y figuras geométricas, podemos hablar de una universalidad en su ámbito de acción, y las bases teóricas están bien establecidas en sus axiomas y teoremas, que pudieron ser sometidos a falsación en las distintas pruebas efectuadas, por tanto, tiene una base científica sólida (Hull 1997).

Al parecer existe suficiente evidencia, como la mostrada acá, para considerar a las LEC, como hipótesis con alto contenido teórico. También, pueden considerarse como un modelo reduccionista y muy abstracto, que convierte

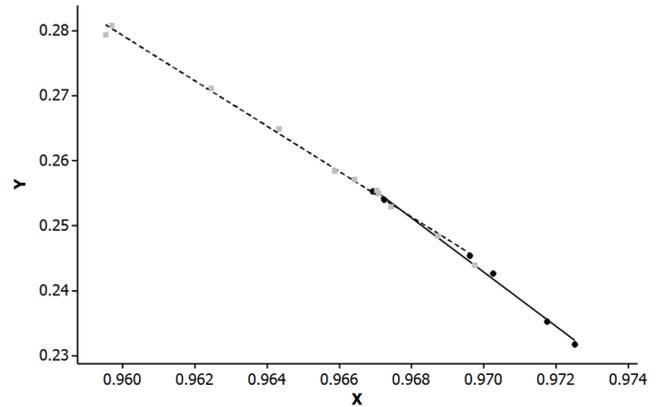


Figura 6. Gráfica de las LEC de las especies *Prochilodus mariae* y *P. rubrotaeniatus*. Puntos negros y línea continua, *P. mariae*; cuadrados grises y línea punteada *P. rubrotaeniatus*. La diferencia entre ambas LEC, es altamente significativa.

una apreciable cantidad de variables de las formas, de un hipervolumen a una línea recta en el plano, que sirve para caracterizar o discriminar una especie, o grupo de ellas, incluso géneros, y poder hacer comparaciones, con otros grupos similares.

REFERENCIAS

- Adams, D. C., F. J. Rohlf & D. E. Slice. 2013. A field comes of age: Geometric morphometrics in the 21st century. *Hystrix* 24: 7–14.
- Bookstein, F. L. 1991. *Morphometric tools for landmark data: Geometry and biology*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, xviii + 435 pp.
- Diez, J. A. & U. Moulines. 1997. *Fundamentos de filosofía de la ciencia*. Barcelona: Editorial Ariel, S. A., 512 pp.
- García-Pérez, J. E. 2021. Generando pseudorréplicas para contrastar hipótesis ecológicas y evolutivas: el caso de un pez ampliamente distribuido en la Orinoquia venezolana. *International Journal of Morphology* 39(4): 1212–1223.
- Hull, D. L. 1997. The ideal species concept – and why we can't get it. pp. 357–380. In: Claridge, M. F., H. A. Dawah & M. R. Wilson. *Species: the units of biodiversity*. London: Chapman and Hall.
- Pickett, S. T. A., J. Kolasa & C. G. Jones. 2007. *Ecological understanding: The nature of theory and the theory of nature*. [2nd ed.]. Burlington, MA/San Diego, CA/ London: Academic Press, x + 233 pp. +[i].
- Popper, K. R. 1967. *El desarrollo del conocimiento científico: conjeturas y refutaciones*. Buenos Aires: Editorial Paidós, 463 pp.
- Zelditch, M. L., D. L. Swiderski, H. D. Sheets & W. L. Fink. 2004. *Geometric morphometrics for biologists: A primer*. Amsterdam: Elsevier, Academic Press, 416 pp.