

ACI (Acoustic Complexity Index): Nueva herramienta para el estudio del canto de anuros

ACI (Acoustic Complexity Index): a new tool to study anuran calls

ANA LOZANO^{1*}, ALMO FARINA^{2**} Y RAFAEL MÁRQUEZ^{1***}

¹Fonoteca Zoológica. Departamento de Biodiversidad y Biología Evolutiva. Museo Nacional de Ciencias Naturales CSIC.

José Gutiérrez Abascal, 2. 28006, Madrid. España. Tel: 91 411 13 28. Fax: 91 564 50 78

²Department of Basic Sciences and Foundations. Università degli Studi di Urbino. Italia.

Correo-e: *analo_alclea912@hotmail.com; **almo.farina@uniurb.it; ***rmarquez@mncn.csic.es

RECIBIDO EL 13 DE JUNIO DE 2014/ ACEPTADO EL 25 DE AGOSTO DE 2014

RESUMEN

El Índice de Complejidad Acústica (ACI) se ha empleado hasta ahora para cuantificar las variaciones de intensidad de las señales acústicas de las comunidades de aves allí donde el ruido antrópico o el de especies invasoras puede estar modificando sus parámetros acústicos originales. El presente estudio representa el primer análisis del canto de anuros mediante el ACI. Primero se obtuvo el índice del canto “estándar” de nueve especies ibéricas. Después se realizaron varias pruebas con coros ibéricos monoespecíficos y, por último, se analizaron coros multiespecíficos de origen ibérico y brasileño, por su variabilidad en biodiversidad. Los resultados demuestran que, con un valor de clumping (índice de agregación temporal de datos) suficientemente bajo, el ACI puede cuantificar la complejidad del canto de una especie en relación a las demás, así como cuantificar las variaciones en la actividad acústica de una población de anuros. El ACI no parece discernir entre coros ibéricos monoespecíficos y multiespecíficos, quizá por la escasa biodiversidad de los últimos. Sin embargo, el incremento del índice es significativo al introducir coros con mayor número de especies como son los brasileños. Este trabajo también pone de manifiesto la sensibilidad del ACI a la cantidad de silencio y a la cantidad de energía de las grabaciones. Estos primeros resultados indican que ACI puede ser una herramienta útil para el seguimiento de poblaciones y comunidades de anuros que se comunican acústicamente, tanto en proyectos de conservación y como en estudios comportamentales de anuros.

Palabras clave: Bioacústica, comunicación acústica, anuros, coros, diversidad acústica.

INTRODUCCIÓN

La bioacústica está experimentando una notable mejora técnica con el desarrollo de herramientas digitales e informáticas de captura y procesamiento de datos, así como de medidas de análisis de los sonidos bióticos. Esto permite avanzar en estudios de seguimiento de poblaciones, de cuantificación de la biodiversidad o de evaluación de comunidades próximas a ambientes antrópicos (Laiolo, 2010; Farina, 2014). De esto último tratan los recientes estudios sobre paisajes sonoros, que se enmar-

ABSTRACT

The Acoustic Complexity Index (ACI) has been used so far, to quantify the intensity variations of the acoustic signals of avian communities, where anthropic noise or the invasive species' sounds may modify their original acoustic parameters. This study is the first analysis of anuran calls with ACI. First, the index from the “standard” call of nine Iberian species was obtained. Then, some tests with Iberian monospecific choruses were made, and, finally, Iberian and Brazilian multispecific choruses were analyzed, considering their biodiversity variability. The results show that, with a sufficiently low clumping parameter, ACI can reflect call complexity at a species-specific level and it can quantify the variations in the acoustic activity of an anuran population. The ACI does not seem to discern between Iberian monospecific and multispecific choruses, which may be due to the scarce biodiversity of the latter. However, the index increases significantly when Brazilian choruses, with higher number of species, are introduced. This paper also highlights the sensitivity of the ACI to the amount of silence and the amount of energy of the recordings. These first results suggest that ACI may be a useful tool for monitoring populations and communities of anuran species with acoustic communication, in conservation projects and behavioural studies.

Key words: Bioacoustics, acoustic communication, Anura, chorus, acoustic diversity.

can en el área de la Ecología denominada Soundscape Ecology (Pijanowsky et al., 2011). Este campo de investigación se basa en el estudio y la interpretación de sonidos animales (biofonías), geofísicos (geofonías) y humanos (antropofonías), y realiza una aproximación al estudio del paisaje en cuanto a su salud ambiental y a su evolución espacio-temporal. En este sentido, resulta esencial la existencia de medidas de análisis de la estructuración de la energía en la composición de sonidos que supone una comunidad biótica en su hábitat.

El ACI (Acoustic Complexity Index) de complejidad acústica, que se puede implementar mediante la aplicación SoundscapeMeter

para el software Wavesurfer, resulta una poderosa herramienta con ese fin (Pieretti et al., 2011). Se trata, básicamente, de una medida de las variaciones de intensidad que se producen a lo largo de un registro sonoro, en las distintas bandas (o “bins”) de frecuencia de la grabación y que da mayor valor a las señales con mayor amplitud. Esta última propiedad lo hace idóneo para el análisis de comunidades de aves o anfibios próximas a áreas con actividad humana, en las que ya se ha comprobado que pueden modificar los patrones de sus vocalizaciones para evitar enmascaramientos por otros sonidos (Bosch et al., 2004; Parris et al., 2009; Both et al., 2012). El ruido de origen antrópico, como el sonido de las carreteras o de los aviones, suele ser monótono y de menor intensidad que los producidos por esos animales, por lo que el ACI le asigna valores menores y cuantifica principalmente la actividad bioacústica en esos ambientes.

Hasta ahora todos los trabajos se han centrado en comunidades de aves (Farina et al., 2011; Farina et al., 2013; Pieretti et al., 2013), por su gran actividad sonora y porque la variedad tonal y de intensidad de sus cantos son ideales para que sean analizadas por el ACI. Estos estudios ya han demostrado que el índice es una herramienta poderosa para caracterizar la actividad sonora de las comunidades de aves, y que es un complemento que refuerza estudios sobre la fenología y el estado de comunidades que pueden estar viéndose afectadas por las actividades humanas o la aparición de especies invasoras. El presente trabajo extiende la aplicación del ACI al estudio de otro grupo de animales que está sufriendo esas mismas amenazas de manera incluso más alarmante en algunos lugares: los anuros. Se trata de un trabajo comparativo (para lo que un índice relativo como el ACI es óptimo), a la vez que arroja más luz sobre las posibles aplicaciones del ACI, así como de algunas limitaciones a la hora de analizar los resultados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Por tratarse de una primera aproximación y para comprobar si este índice puede aplicarse

también a la caracterización de cantos y coros aislados con un componente más descriptivo que fenológico, el objeto de estudio fueron grabaciones de coros de diversa composición específica y sonora, así como de diferente tamaño y origen. Este trabajo se ha centrado en las 9 especies con mayor actividad sonora de la Península Ibérica (*Alytes obstetricans*, *Alytes cisternasii*, *Pelodytes ibericus*, *Pelodytes punctatus*, *Hyla arborea*, *Hyla meridionalis*, *Epidalea calamita*, *Bufo viridis* y *Pelophylax perezi*) y al final se emplearon también algunas grabaciones de coros de Brasil por su mayor biodiversidad en comparación con cualquiera de los coros de origen ibérico.

Las grabaciones elegidas para este trabajo proceden de la Fonoteca Zoológica del Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid.

Herramientas informáticas

Para el análisis y edición de los registros sonoros se emplearon diversos programas informáticos. En Audacity se realizó la edición básica de todas las grabaciones: establecer la duración y normalizarlas para estandarizarlas en función del pico de intensidad más alto de la grabación, y así reducir las diferencias debidas a las distancias a las que fueron grabados los cantos, a los equipos que se emplearon para ello o a las condiciones ambientales durante la grabación. En WaveSurfer se utilizó la aplicación SoundscapeMeter para calcular el índice ACI. Con Adobe Audition se aplicó un filtro de eliminación de silencio a cada grabación para el cálculo del duty cycle (proporción de sonido sobre silencio de una grabación). Y Raven Pro 1.4 fue empleado para aplicar un filtro de ruido a las grabaciones de cantos del género *Alytes* y calcular el RMS en la prueba con coros monoespecíficos para cuantificar la media de ruido de las grabaciones.

Los ajustes seleccionados para analizar con el ACI todas las grabaciones en la aplicación SoundScapeMeter fueron: FFT= 512, que determina que se divida en 256 compartimentos el eje de frecuencias en la matriz de valores del ACI; clumping= 0,1 segundos, que significa que se calcula el índice para cada 0,1 segundos de la grabación, y un filtro de ruido

de 10,000 que elimina del cálculo del índice aquellos valores de intensidad inferiores a ese valor. El valor de clumping muy bajo es importante para que el ACI pueda detectar las rápidas modificaciones de intensidad y frecuencia presentes en las llamadas pulsadas de los anuros. El ACI total de una grabación, ACItot (llamado ACI, como nombre genérico, y se especificará cuando se haga referencia al valor parcial de ACI), es el promedio de todos los ACI parciales.

Análisis de los cantos individuales

Se obtuvo el ACI del canto “estándar” de cada una de las especies, para lo que se buscaron grabaciones en las que las vocalizaciones de un individuo se aproximaran lo más posible a la descripción del canto de cada una en la literatura.

Para la elección del canto individual de cada especie se consultaron las publicaciones que los describen (Steinwarz y Schneider, 1991 para *P. perezi*; Schneider, 2000, para *H. arborea*; Pargana et al., 2003, para *P. ibericus*; Arak, 1988 y Tejedo, 1988, para *E. calamita*). Cuando no se encontraron dichos artículos se consultó www.vertebradosibericos.org/anfibios (Salvado y Martínez Solano, 2014).

El tiempo de las grabaciones se estandarizó con base en el canto de mayor duración, el de *H. arborea*, que consta de dos pulsos, con un único silencio entre ellos y con duración de 23 segundos. Las grabaciones de las demás especies constan del sonido que pueden producir durante ese tiempo. De ese modo se intenta anular el efecto que producen las diferencias de duración y de silencios sobre el valor del índice ACI.

Análisis de los coros monoespecíficos

A continuación se analizaron coros monoespecíficos de las mismas especies para comprobar si sus ACI se correspondían en proporción con los valores de la primera prueba de cantos individuales. Esto permite deducir si el índice capta de igual manera la complejidad acústica de un patrón de sonido cuando éste suena aislado o se suma en un grupo, o si se producen variaciones. También se exploró si el valor del ACI se relaciona inversamente con

la cantidad de silencio en estas grabaciones, representada por el valor inverso del ciclo de trabajo (duty cycle) en cada grabación. Por otra parte, tomando coros monoespecíficos de menor a mayor densidad de vocalizaciones, se obtuvo el RMS (Root Mean Square o valor cuadrático medio) de cada grabación, que es una medida de la energía que se puede interpretar como la cantidad relativa de individuos en el coro, para comprobar si se correlaciona con el ACI. Y por último, se probó la sensibilidad del ACI en dos casos más concretos. En primer lugar, un coro monoespecífico en el que se va incrementando el número de voces para luego disminuir. Y en segundo lugar, otro coro en el que el número de voces incrementa todo el rato. En este caso interesaban los valores de ACI a lo largo de la grabación, otra posibilidad que ofrece SoundscapeMeter, pues se deducía que éstos se modularían a la par que lo hacía la densidad del coro.

Para la primera prueba con coros monoespecíficos se tomaron cinco grabaciones por especie, 45 grabaciones en total, más y menos ruidosas, semejante a la variedad que se puede encontrar en la naturaleza. Todas tienen una duración de 10 segundos, que son suficientes para cuantificar la variación de intensidades y no dejan mucha posibilidad a la aparición de otros sonidos de fondo que puedan distorsionar el valor del índice. Para obtener el ciclo de trabajo (duty cycle) de todas las grabaciones en Adobe Audition, todo fragmento de más de 10 milisegundos (ms) por debajo de los -36 dB se consideró silencio, y todo fragmento de más de 25 ms por encima de los -36 dB se consideró audio. En las grabaciones de los coros de las dos especies del género *Alytes* se aplicó un filtro de ruido entre los 800Hz y los 2,200Hz con Raven Pro 1.4, pues éstas tenían un ruido de fondo que parece modificar el valor del ACI debido a una menor relación sonido-ruido en ellas.

En la segunda prueba con coros monoespecíficos se emplearon 10 grabaciones del género *Alytes* (*A. obstetricans* y *Alytes cisternasi*), 17 grabaciones de *Epidalea calamita*, 22 grabaciones de *Hyla arborea* y 24 grabaciones de *Pelodytes perezii*, clasificadas dentro de cada grupo en las categorías de coros: escaso, poco ruidoso,

semiruidoso y ruidoso. Cada grupo se filtró en Raven Pro 1.4 para eliminar el ruido fuera de la banda de frecuencias predominante en cada caso. El RMS se obtuvo con Raven Pro 1.4 en cada grabación una vez que fueron filtradas.

Para la prueba de los coros modulados se emplearon coros monoespecíficos de *Hyla meridionalis*. Uno consiste en una densidad de vocalizaciones crecientes y dura 1 min 26 s, mientras que el otro la densidad de vocalizaciones asciende y desciende y dura 1 min 50 s. Ambas grabaciones fueron también filtradas y normalizadas. En este caso se obtuvo el ACI para cada fragmento de 0.1 segundos, lo que supone 929 valores en la primera grabación y 1,186 en la segunda, que permitió ver la tendencia a lo largo del tiempo.

Análisis de los coros multiespecíficos

Se realizaron dos pruebas con coros multiespecíficos. En el primero quisimos comparar los ACI de estos coros monoespecíficos con los de los coros multiespecíficos que se pueden encontrar en la Península Ibérica (compuestos por dos o tres especies, normalmente), bajo la hipótesis de que la complejidad acústica de los segundos será mayor debido a una mayor diversidad tonal y de frecuencias. En el segundo comparamos varios coros multiespecíficos de origen ibérico, con dos y tres especies, con varios de Brasil, de entre tres y seis especies, suponiendo que el número de especies se correlaciona con el ACI y sería mayor en los coros de Brasil.

Para la primera prueba con coros multiespecíficos se eligieron 9 grabaciones con algunas de las combinaciones de especies que pueden encontrarse en la naturaleza (*E. calamita* y *B. viridis*; *B. H. arborea* y *B. viridis*; *P. punctatus* y *E. calamita*; *H. arborea* e *H. meridionalis*; *P. perezi* y *A. obstetricans*; *H. meridionalis* y *E. calamita*; *H. arborea* y *E. calamita*; *P. perezi* e *H. arborea*; *H. arborea*, *H. meridionalis* y *P. perezi*). Estas grabaciones tienen también una duración de 10 segundos y se normalizaron para estandarizarlas del mismo modo que las de coros monoespecíficos, con los que los que fueron comparadas de forma muy sencilla, enfrentando los promedios de ambos grupos y sus desviaciones estándar en una gráfica de caja y bigotes.

En la segunda prueba con coros multiespecíficos se compararon los ACI de los coros multiespecíficos ibéricos de la prueba anterior, con 9 coros multiespecíficos de Brasil de entre 3 y 6 especies. Estas grabaciones también duran 10 segundos y se normalizaron.

Pruebas estadísticas

Con un ANOVA se comprobó si el factor especie influye sobre la variable ACI, a través de los valores de ACItot de los coros monoespecíficos. Posteriormente, a través de *post hoc*s, se estudió la significación entre los niveles del factor, es decir, entre las especies. Mediante la prueba de Tukey se obtuvieron las significaciones de todas las combinaciones posibles entre las especies. El resto de las pruebas que buscaban alguna significación de los resultados consistieron en correlaciones simples y T de Student.

RESULTADOS

Cantos individuales

La Figura 1 muestra los valores de ACI para los cantos “estándar” de las 9 especies ibéricas. Se ordenaron los valores de menor a mayor para establecer una comparación entre especies y obtener la relación entre el tipo de canto y el valor del ACI.

Coros monoespecíficos

En la Figura 2 aparecen las 45 grabaciones empleadas en esta primera prueba con coros monoespecíficos, agrupadas por especies, y éstas aparecen a propósito en el mismo orden que presentaban los cantos individuales “estándar” de menor a mayor ACI. De este modo se puede apreciar que la complejidad acústica relativa de los cantos de las especies estudiadas se mantiene al analizar coros monoespecíficos de las mismas. Se observa que las grabaciones de *Alytes* son las menos complejas, acústicamente. Es cierto que estas son las únicas filtradas, pero el resto de grabaciones son más limpias y, además, el canto del género *Alytes* es claramente mucho más sencillo que el de las demás especies. Si se calculan las medias del ACI por especie, los valores son los siguientes: 295,536 *A. obstetricans* < 377,587 *A. cisternasii* < 991,049 *B. viridis* < 1731,423 *P.*

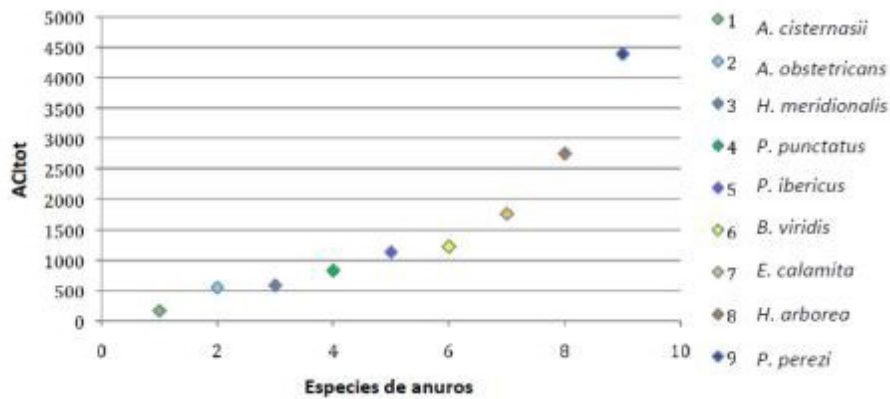


Figura 1. Valores del ACI para el canto de cada especie, ordenados de menor a mayor.

punctatus < 1771,626 *P. ibericus* < 1814,085 *H. meridionalis* < 1859,066 *E. calamita* < 2182,909 *H. arborea* < 3050,069 *P. perezii*. La complejidad acústica de los coros monoespecíficos analizados se aproxima al modelo establecido con los cantos individuales representativos de cada especie, con la diferencia de que *B. viridis* e *H. meridionalis* han intercambiado su posición en dicho orden.

El resultado del ANOVA indica que el factor especie influye significativamente en el ACI ($F(8,36) = 18,508$; $P < 0,001$). Los análisis *Post hoc* mostraron entre qué especies es diferente el valor de ACI (Anexo I). En todas las comparaciones con *A. cisternasii* y *A. obstetricans* el resultado es significativo, excepto al compararlos con *B. viridis*. Todas las comparaciones con

P. perezii tienen también un resultado significativo. Lo mismo sucede con el análisis de *H. arborea* con *B. viridis*.

La correlación entre complejidad acústica, representada por el ACI, y cantidad de silencio, cuantificada con la inversa del ciclo de trabajo (*duty cycle*) de cada grabación, es significativamente negativa. La estimación de la correlación es la siguiente: $r = -0,74$; $t = 8,41$; $df = 8$; $p = < 0,001$. En la Figura 3 se encuentran representados los valores promediados de ambos parámetros para cada especie, a partir de las mismas grabaciones que en la figura anterior, y la línea de tendencia de la correlación.

En cuanto al test del RMS en grabaciones con distintos niveles de “ruidosidad”, la corre-

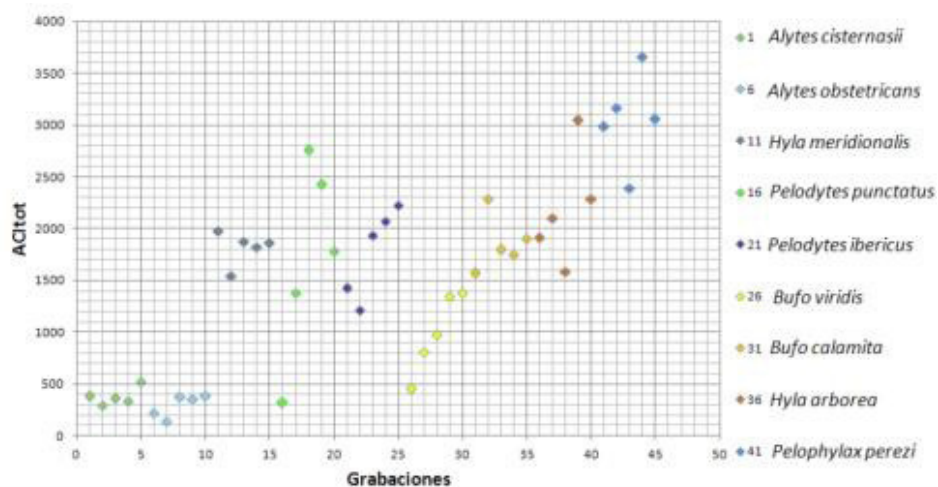


Figura 2. Valor del ACI para las 45 grabaciones de coros monoespecíficos agrupadas por especies. Las especies se muestran en el mismo orden en que se representan en la Figura 1, de modo que se aprecia una tendencia similar.

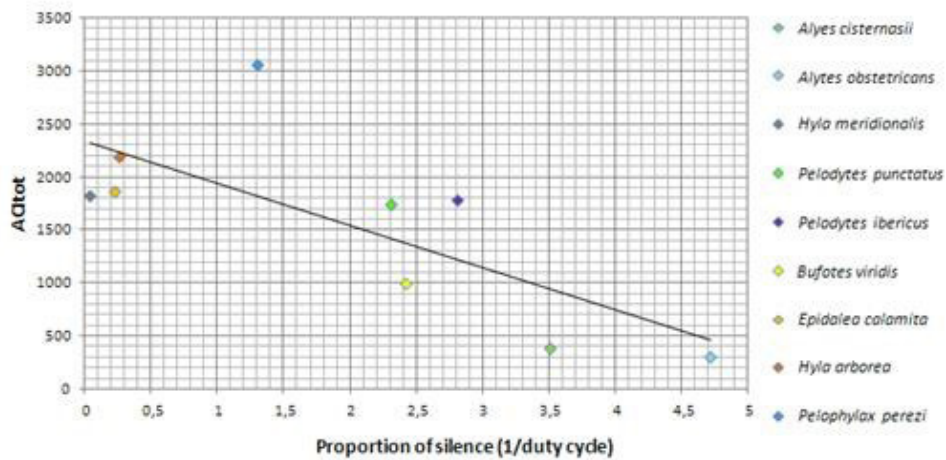
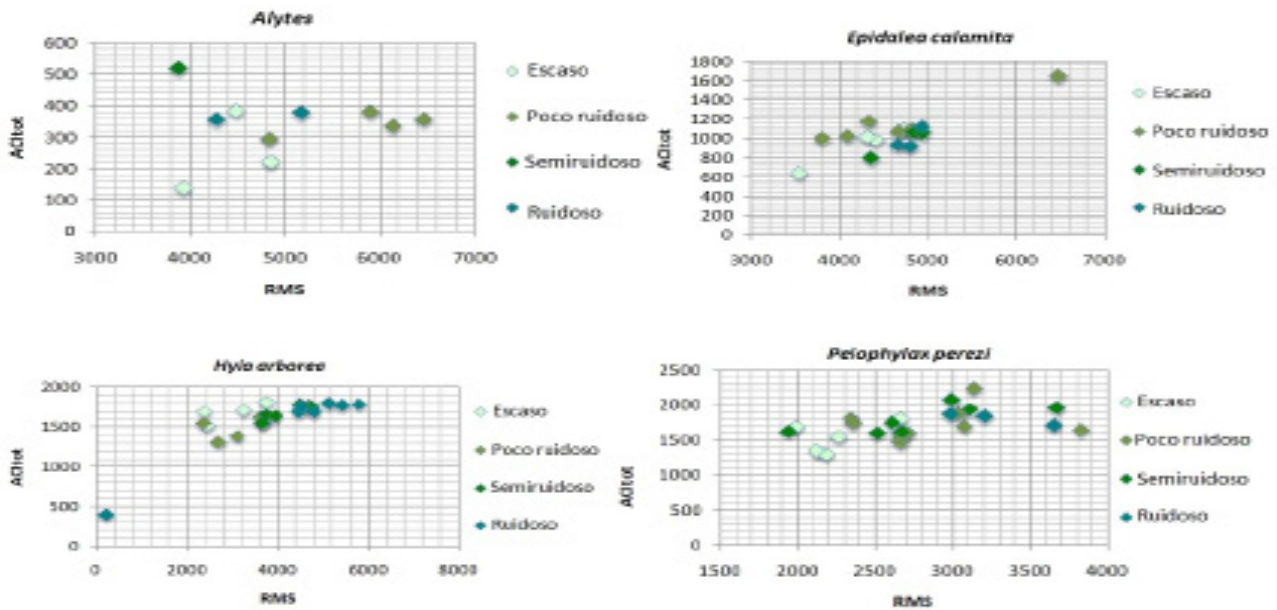


Figura 3. Valores del ACI promediado en relación con la proporción de silencio promediada para cada especie.

lación de ese parámetro con el ACI de las grabaciones está representada en las Figuras de la 4 a la 7 y los valores de dichas correlaciones son los siguientes: *Alytes*: $r = 0.085587099$, $t = 46.91151821$, $df = 9$ y $p = 4.55097 \cdot 10^{-12}$ (< 0.001); *Epidalea calamita*: $r = 0.828846304$, $t = 63.02483309$, $df = 15$ y $p = 1.32775 \cdot 10^{-19}$ (< 0.001); *Hyla arborea*: $r = 0.803236871$, $t = 10.49678015$, $df = 21$ y $p = 8.23416 \cdot 10^{-10}$ (< 0.001); *Pelophylax perezi*: $r = 0.505263628$,

$t = 12.65374784$, $df = 23$ y $p = 7.61238 \cdot 10^{-12}$ (< 0.001). La correlación es significativa en todos los casos, pese al reducido número de réplicas que se pudo emplear en todos los casos.

En la última prueba con coros monoespecíficos, en los que la densidad variable de *Hyla meridionalis* emitiendo llamadas originaba coros de intensidad y complejidad aparentemente cambiantes, los valores de ACI a lo largo de las grabaciones parecen acompañar a esa modulación,



Figuras 4 a 7: Correlación entre el ACI (Acoustic Complexity Index) y el RMS (Root Mean Square) en coros de distinto nivel de "ruidosidad" del género *Alytes* y de las especies *Epidalea calamita*, *Hyla arborea* y *Pelophylax perezi*.

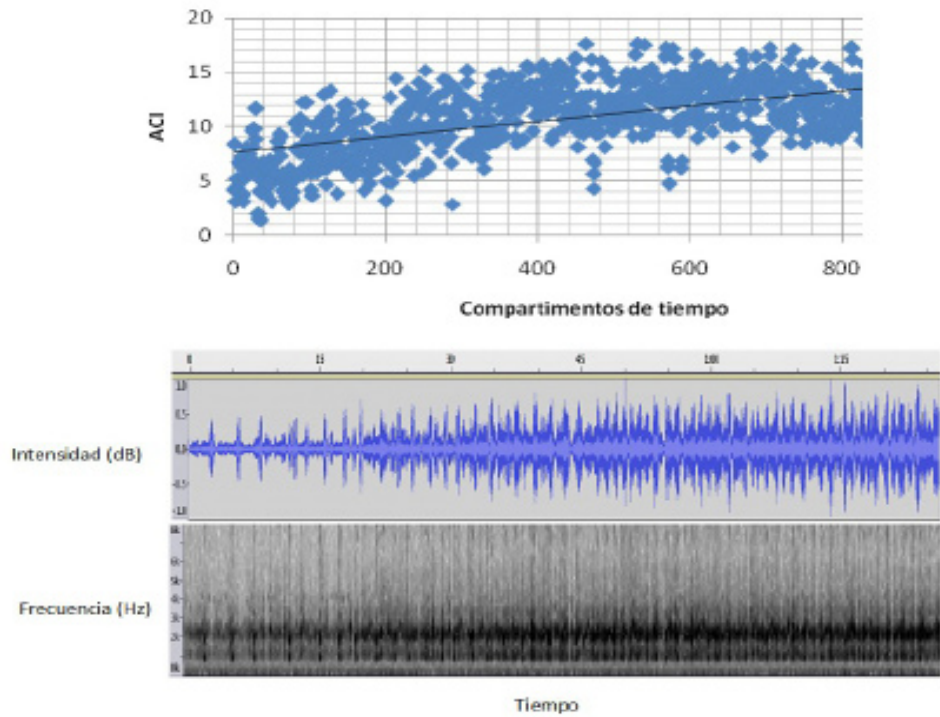


Figura 8. Valores de ACI a lo largo de la grabación de un coro de intensidad ascendente de *Hyla meridionalis* junto al oscilograma y el espectrograma de la misma grabación. En el espectrograma (abajo) las tonalidades de grises indican la intensidad.

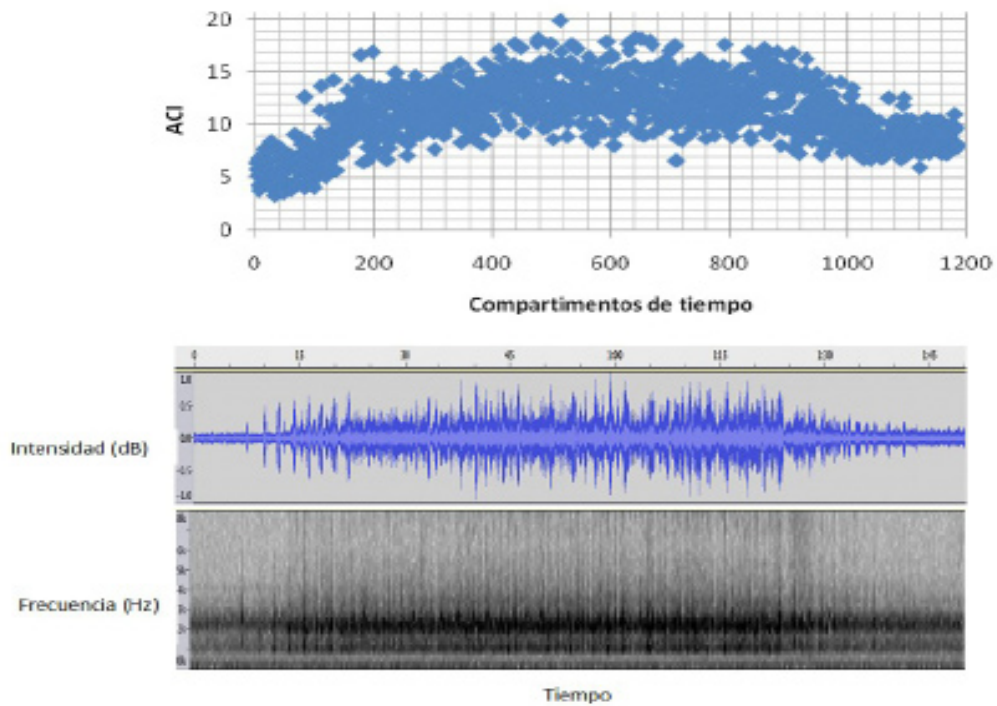


Figura 9. Valores de ACI a lo largo de la grabación de un coro de intensidad ascendente y descendente de *Hyla meridionalis* junto al oscilograma y el espectrograma de la misma grabación. En el espectrograma (abajo) las tonalidades de grises indican la intensidad.

ascendiendo cuando la densidad de vocalizaciones es mayor y descendiendo cuando es menor. En las Figuras 8 y 9 se puede observar la tendencia del ACI a lo largo del tiempo, junto al oscilograma y el espectrograma de las grabaciones, en los que también se aprecia la oscilación de la intensidad del sonido.

Coros multiespecíficos

La comparación entre el ACI medio de los coros mono-específicos y el ACI medio de los coros multiespecíficos, todos de origen ibérico, se calculó con una T de Student cuyo resultado es el siguiente: $t=$

0,052; $p > 0,05$ y que evidencia la carencia de diferenciación entre ambos grupos (Figura 10).

Por último, en la correlación del ACI de coros multiespecíficos ibéricos con el de coros multiespecíficos brasileños con el número de especies en cada uno de ellos, los resultados significativos de la correlación fueron: $r= 0.089332854$, $t= 18.0650517$, $df= 17$ y $p= 1.56772 \cdot 10^{-12} (<0.001)$ (Figura 11).

DISCUSIÓN

Cantos individuales

Teniendo en cuenta nuestro conocimiento

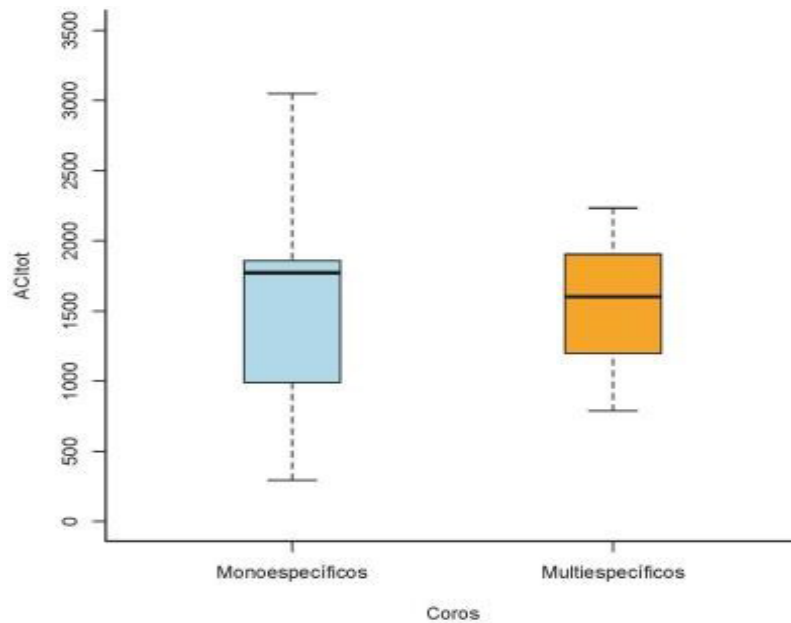


Figura 10. Valores promedio del ACI de los coros ibéricos mono-específicos y multiespecíficos. Se observa que no hay diferencia significativa entre ambos grupos de valores.

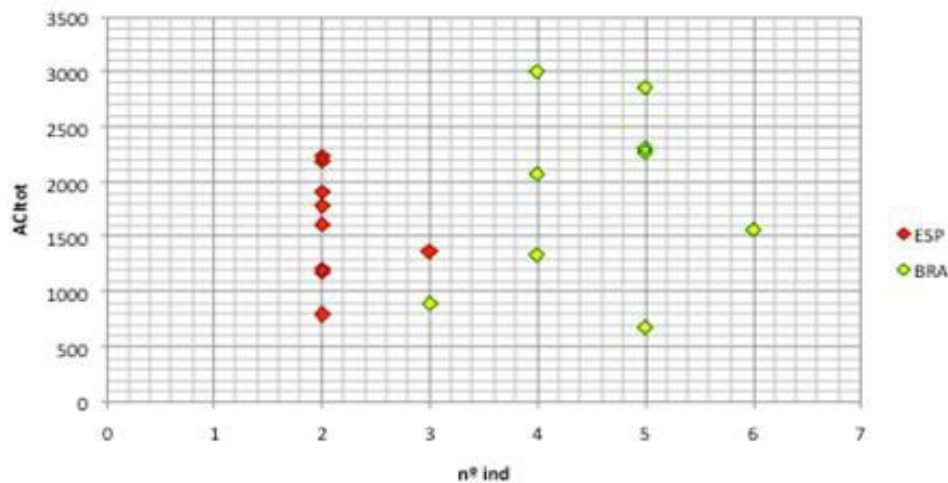


Figura 11. Valores del ACI de distintas grabaciones de coros multiespecíficos de España y de Brasil en función del número de especies que suenan en cada coro.

previo sobre los cantos de estas especies de anuros, se han obtenido algunos resultados esperados en esta primera prueba del ACI como cuantificador de complejidad acústica de este tipo de sonidos. Para empezar, los cantos del género *Alytes*, que constan de cortos pulsos tonales, han obtenido los valores más bajos de ACI. Los parámetros descritos para el canto de ambas especies son muy similares, por lo que no podemos asegurar si la complejidad acústica de *A. cisternasii* es realmente menor que la de *A. obstetricans* o si se trata de un resultado circunstancial. A su vez, y como también esperábamos, el canto de *P. perezi* ha obtenido el mayor valor de ACI. Es una especie que tiene un repertorio acústico muy variado, comparado con el resto de los anuros ibéricos. *H. arborea*, cuyo canto consta de pulsos muy repetidos y no tonales, presenta un ACI inferior. En el resto de datos se observa la proximidad entre especies del mismo género en el caso de *Pelodytes* y los del antiguo género *Bufo* (Epidalea y Bufotes), cuyos cantos son muy similares. Los valores para el género *Hyla* no están cercanos. Esto se debe a que los cantos de *H. meridionalis* (más prolongado y menos variable en el tiempo) e *H. arborea* (pulsos repetidos con mucha frecuencia) son más diferentes entre sí.

Con estos resultados se ha podido comprobar que este Índice de Complejidad Acústica puede cuantificar las diferencias en las variaciones de intensidad que podemos apreciar con nuestro oído, entre sonidos que varían notablemente en cuanto a ese parámetro. Podemos considerar la jerarquía obtenida como modelo que define las diferencias de complejidad acústica relativas entre las 9 especies de anuros, de cara a las siguientes pruebas y a futuros trabajos.

Coros monoespecíficos

Según la representación gráfica en la Figura 2 y las medias del ACI por especie, podemos afirmar que la complejidad acústica de los coros monoespecíficos se aproxima, relativamente, a la de los cantos que componen esos coros por separado en casi todas las especies analizadas. Se han encontrado diferencias en

B. viridis e *H. meridionalis*. Son grabaciones limpias y variadas en cuanto a cantidad de individuos. Una posible explicación podría ser que, cuando se organizan los coros de estas dos especies, la combinación de los cantos provoca un efecto de simplificación y de complicación de la señal acústica, respectivamente. Este hecho, de ser cierto, podría ser de gran interés en el estudio de la selección de área de apareamiento por parte de las hembras o de la competencia interespecífica. La posición inversa de las especies de *Alytes* con respecto al orden de los cantos “estándar” puede deberse a las características de las grabaciones empleadas, pues las diferencias en el canto de ambas especies son muy pequeñas y su ACI va a ser siempre muy similar. Con el ANOVA y los *post hoc*s confirmamos principalmente el efecto que tiene el factor especie en el ACI de los coros de las dos especies del género *Alytes* y a *P. perezi*, que son las que difieren con un mayor número de especies en su valor del índice. Esto puede observarse en el Anexo I, que contiene un cuadro con la significación de los *post hoc*s para cada una de las comparaciones entre pares de especies.

Aunque la correlación entre ACItot y proporción de silencio no es muy significativa, podemos afirmar que es inversa. Las especies con los valores más bajos de ACItot, principalmente el género *Alytes*, son las de los coros con la proporción más elevada de silencio. Sin embargo, las especies con el ACItot más alto, especialmente *P. perezi*, no son las de menor proporción de silencio en sus cantos, al menos en las grabaciones que analizamos. Futuros análisis deberían tener un mayor tamaño muestral para contrastar estos resultados.

La prueba de correlación del ACI con el RMS muestra resultados significativos, sin embargo, volvemos a incidir en la necesidad de un tamaño muestral mayor para confirmar estos resultados. Resulta muy complicado encontrar en las bases de datos las grabaciones apropiadas para este tipo de análisis. Se requiere mucho tiempo de escucha y de edición de registros sonoros para hacerse de un buen número de muestras. En vista de nuestros re-

sultados, parece que el ACI sí puede ser indicador de la cantidad de energía de este tipo de grabaciones, que se traduce en cantidad de ruido en este trabajo.

El análisis de las grabaciones de intensidad variable en un coro de *Hyla meridionalis* arroja resultados mucho más sólidos. El ACI, a lo largo del eje del tiempo en estas grabaciones, refleja claramente de qué modo se modula la intensidad en esos coros, según se unen o se callan individuos. Esta es la prueba que más se aproxima a los trabajos previos en los que se ha empleado este índice para monitorizar la actividad acústica de comunidades de aves a lo largo del tiempo. Será muy interesante continuar en esta dirección en próximos trabajos de seguimiento de la actividad de comunidades de anuros. El ACI puede suponer una herramienta muy útil que complementa a otros índices ya existentes, como el índice de entropía acústica (H), el índice de riqueza acústica (AR) o el índice de disimilaridad acústica (D) (Depraetere et al., 2012).

Coros multiespecíficos

Los coros ibéricos multiespecíficos no parecen tener valores de ACI marcadamente superiores a los coros monoespecíficos. Hay que considerar que el número de especies que pueden cantar juntas en la Península Ibérica es muy limitado (3 o 4 especies, a lo sumo) y que estos números no son comparables con los coros de zonas tropicales donde diez o veinte especies pueden cantar en un mismo coro. Ello sugiere que conviene ponderar las especies por la complejidad de su repertorio acústico para poder establecer una correlación más sólida entre el ACI y la biodiversidad de los coros.

En la primera incursión en la comparación de coros multiespecíficos ibéricos con los brasileños, estos últimos de mayor diversidad, se obtuvo un incremento significativo del ACI a medida que el número de especies en el coro es mayor. Sin embargo, creemos que es necesario profundizar en el análisis del ACI con relación a la variación de biodiversidad, pues no sabemos aún en qué medida o de qué manera este índice es sensible a ese factor. Estos primeros resultados son un interesante punto de partida.

CONCLUSIONES

Este trabajo pretendió ampliar la aplicación del Índice de Complejidad Acústica (ACI) hacia el estudio de la bioacústica de anuros. Se trata de una primera aproximación en la que hemos querido abrir los diversos frentes que creemos que pueden ser más prósperos. En la mayoría de las pruebas hemos logrado aclarar un poco más qué cuantifica el ACI y qué aplicaciones pueden tener más utilidad en un futuro. Creemos que este índice es muy prometedor como complemento en estudios que se centren en la caracterización de la actividad acústica de poblaciones y comunidades de anuros. El ACI puede llegar a ser una herramienta más a la hora de seguir poblaciones en programas de conservación, así como en estudios más centrados en el comportamiento reproductivo o la fenología de otros aspectos de la ecología de los anuros.

AGRADECIMIENTOS

A los doctores Diego Llusia y Carolina Bravo, por su ayuda en informática y estadística. Este trabajo no hubiera sido posible sin las grabaciones de anfibios proporcionadas por Almudena González, responsable de la Fonoteca Zoológica del MNCN. Parcialmente financiado por proyecto MICINN CGL2011-25062 (PI R. Márquez).

REFERENCIAS

- Arak, A. 1988. Female mate selection in the natterjack toad: active choice or passive attraction? *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 22(5): 317-327.
- Bosch, J. y De la Riva, I. 2004. Are frog calls modulated by the environment? An analysis with anuran species from Bolivia. *Canadian Journal of Zoology*, 82: 880-888.
- Both, C. y Grant, T. 2012. Biological invasions and the acoustic niche: the effect of bullfrog calls on the acoustic signals of white-banded tree frogs. *Biology letters*, 8: 714-716.
- Depraetere, M.; Pavoine, S.; Jiguet, F.; Gasc, A.; Duvail, S. y Sœur, J. 2012. Monitoring animal diversity using acoustic indices: implementation in a temperate woodland. *Ecological indicators*, 13: 46-54.
- Farina, A. 2014. *Soundscape Ecology*. Springer, Dordrecht, NL.
- Farina, A.; Pieretti, N. y Piccioli, L. 2011. The soundscape methodology for long-term bird monitoring: A Mediterranean Europe case-study. *Ecological Informatics*, 6: 354-363.
- Farina, A.; Pieretti, N. y Morganti, N. 2013. Acoustic patterns of an invasive species: the Red-billed *Leiothrix* (*Leiothrix lutea* Scopoli 1786) in a Mediterranean shrubland. *Bioacoustics*, 22(3), 175-194.
- Laiolo, P. 2010. The emerging significance of bioacoustics in animal species conservation. *Biological conservation*, 143: 1635-1645.

- Pargana, J.M.; Márquez, R.; Reques, R.; Sánchez-Herraiz, M.J.; Tejedo, M. y Crespo, E.J. 2003. The mating call of *Pelodytes ibericus* (Anura, *Pelodytidae*). *Herpetological journal*, 13(4): 199-204.
- Parris, K.M.; Velik-Lord, M. y North, J.M.A. 2009. Frogs call at a higher pitch in traffic noise. *Ecology and Society*, 14(1), 25.
- Pieretti, N.; Farina, A. y Morri, D. 2011. A new methodology to infer the singing activity of an avian community: The Acoustic Complexity Index (ACI). *Ecological Indicators*, 11: 868-873.
- Pieretti, N. y Farina, A. 2013. Application of a recently introduced index for acoustic complexity to an avian soundscape with traffic noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 134(1): 891-900.
- Pijanowski, B.C.; Farina, A.; Gage, S.H.; Dumyahn, S.L. y Krause, B.L. 2011. What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science. *Landscape Ecology*. 26:1213-1232.
- Salvador, A. y Martínez Solano, I. 2013. Enciclopedia virtual de los vertebrados españoles MNCN CSIC. www.vertebradosibericos.org/anfibios Consultada en junio, 2014.
- Schneider, H. 2000. Bioacoustic demonstration of the Tree Frog, *Hyla arborea*, (Amphibia: Anura) in western Turkey. *Zoology in the Middle East*, 21: 77-85.
- Steinwarz, D. y Schneider, H. 1991. Distribution and bioacoustics of *Rana perezi* Seoane, 1885 (Amphibia, Anura, *Ranidae*) in Tunisia. *Bonner zoologische Beiträge*, 42: 283-297.
- Tejedo, M. 1988. Fighting for females in the toad *Bufo calamita* is affected by the operational sex ratio. *Animal Behaviour*, 36(6): 1765-1769.

ANEXO

Especie	diff	lwr	upr	p adj
<i>A obstetricans-A cisternasii</i>	-82.05149	-1032.88033	868.7774	0.9999983
<i>B calamita-A cisternasii</i>	1481.47850	530.64965	2432.3073	0.0003079 *
<i>B viridis-A cisternasii</i>	613.46206	-337.36678	1564.2909	0.4718729
<i>H arborea-A cisternasii</i>	1805.32144	854.49260	2756.1503	0.0000104 *
<i>H meridionalis-A cisternasii</i>	1436.49757	485.66872	2387.3264	0.0004899 *
<i>P ibericus-A cisternasii</i>	1394.03906	443.21022	2344.8679	0.0007572 *
<i>P punctatus-A cisternasii</i>	1353.83560	403.00675	2304.6644	0.0011397 *
<i>R perezi-A cisternasii</i>	2672.48185	1721.65301	3623.3107	0.0000000 *
<i>B calamita-A obstetricans</i>	1563.52998	612.70114	2514.3588	0.0001311 *
<i>B viridis-A obstetricans</i>	695.51355	-255.31530	1646.3424	0.3085404
<i>H arborea-A obstetricans</i>	1887.37293	936.54408	2838.2018	0.0000044 *
<i>H meridionalis-A obstetricans</i>	1518.54905	567.72021	2469.3779	0.0002096 *
<i>P ibericus-A obstetricans</i>	1476.09054	525.26170	2426.9194	0.0003256 *
<i>P punctatus-A obstetricans</i>	1435.88708	485.05824	2386.7159	0.0004930 *
<i>R perezi-A obstetricans</i>	2754.53334	1803.70449	3705.3622	0.0000000 *
<i>B viridis-B calamita</i>	-868.01644	-1818.84528	82.8124	0.0966984
<i>H arborea-B calamita</i>	323.84295	-626.98590	1274.6718	0.9666871
<i>H meridionalis-B calamita</i>	-44.98093	-995.80977	905.8479	1.0000000
<i>P ibericus-B calamita</i>	-87.43944	-1038.26828	863.3894	0.9999973
<i>P punctatus-B calamita</i>	-127.64290	-1078.47174	823.1859	0.9999488
<i>R perezi-B calamita</i>	1191.00335	240.17451	2141.8322	0.0057135 *
<i>H arborea-B viridis</i>	1191.85938	241.03054	2142.6882	0.0056666 *
<i>H meridionalis-B viridis</i>	823.03551	-127.79334	1773.8644	0.1349042
<i>P ibericus-B viridis</i>	780.57700	-170.25185	1731.4058	0.1813329
<i>P punctatus-B viridis</i>	740.37354	-210.45531	1691.2024	0.2356281
<i>R perezi-B viridis</i>	2059.01979	1108.19095	3009.8486	0.0000007 *
<i>H meridionalis-H arborea</i>	-368.82387	-1319.65272	582.0050	0.9310675
<i>P ibericus-H arborea</i>	-411.28238	-1362.11123	539.5465	0.8801848
<i>P punctatus-H arborea</i>	-451.48585	-1402.31469	499.3430	0.8163943
<i>R perezi-H arborea</i>	867.16041	-83.66844	1817.9893	0.0973303
<i>P ibericus-H meridionalis</i>	-42.45851	-993.28735	908.3703	1.0000000
<i>P punctatus-H meridionalis</i>	-82.66197	-1033.49081	868.1669	0.9999982
<i>R perezi-H meridionalis</i>	1235.98428	285.15544	2186.8131	0.0036912 *
<i>P punctatus-P ibericus</i>	-40.20346	-991.03231	910.6254	1.0000000
<i>R perezi-P ibericus</i>	1278.44279	327.61395	2229.2716	0.0024283 *
<i>R perezi-P punctatus</i>	1318.64625	367.81741	2269.4751	0.0016253 *

* El análisis Post Hoc es significativo escogiendo un valor de significación del 0.05, como indica la última columna.