

Paisaje sonoro en bosques de montaña de Guatemala

Pablo Rafael Bolaños Sittler¹ & Federico Villatoro Paz²

¹Departamento de Biología, Facultad de Ciencias y Humanidades, Universidad del Valle de Guatemala

pbolanoss@gmail.com

²Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad de San Carlos de Guatemala

fvillatoropaz@gmail.com

RESUMEN: El “paisaje sonoro” son todas las señales sonoras generadas en un área, la hipótesis del nicho acústico establece que cada especie animal emite sonidos que ocupan un lugar único en el “espacio” sonoro, y evitan el traslape con otros sonidos animales. Con base en esto se puede decir que en un paisaje en donde existen más sonidos distintos, existe mayor biodiversidad que otro en donde haya menos. Dependiendo del tipo de sonidos que existan en un paisaje sonoro se puede determinar qué tan perturbado podría estar un sitio. En este trabajo se describen cinco áreas, utilizando grabaciones de paisaje sonoro. Se hizo una descripción de los sitios por medio de seis índices acústicos y se determinó el uso del suelo en las áreas de grabación. Los resultados obtenidos reflejan que esta disciplina tiene grandes potenciales para la determinación de la biodiversidad en un sitio; los resultados de los índices concuerdan con el uso del suelo determinado por medio de sistemas de información geográfica, obteniéndose índices de biodiversidad mayores en las áreas mejor conservadas. Esta investigación es un paso importante para el desarrollo de metodologías menos costosas para el monitoreo de biodiversidad en Guatemala y constituye el primer estudio de paisaje sonoro en el país.

PALABRAS CLAVE: Paisaje sonoro, ecoacústica, bioacústica, monitoreo, biodiversidad, bosque de montaña, Guatemala.

Soundscape in mountain forests of Guatemala

ABSTRACT: The soundscape refers to all sound signals in an area, the acoustic niche hypothesis establishes that every single animal species has a unique acoustic “space”, avoiding overlapping with other animal sounds. According to this hypothesis we can say that a soundscape with more different sounds, has more

biodiversity than other soundscape less rich in sound diversity. In addition according to the sound types present, it can be possible to determine how perturbed can be a site. In this work we describe five areas, using soundscape recordings. A description of the sites was made with six different acoustic indices, and the land use around the recording sites was described. The results obtained suggests that this discipline has important potentials for the biodiversity determination. The results obtained with the indices support the observations with geographic information systems, with better quality (according to the indices) in the areas with better quality forests. This research is an important step for the development of less expensive methodologies for biodiversity monitoring in Guatemala, also it represents the first soundscape study on the country.

KEYWORDS: Soundscape, ecoacoustics, bioacoustics, biodiversity, monitoring, mountain forest, Guatemala.

Introducción

La estimación de la biodiversidad es un tema central en biología de la conservación, no solo para determinar la riqueza de especies (diversidad α) sino también para evaluar diferencias en la composición de especies entre comunidades, en diferentes áreas o a través del tiempo (diversidad β) (Magurran, 2004; Ludwig & Reynolds, 1988; Sayre, 2000). Algunos métodos para calcular la diversidad requieren de la creación de inventarios de especies, lo cual es costoso, necesita de la participación de taxónomos expertos (Sueur et al., 2008) y muchos requieren de técnicas invasivas como la colecta o manipulación de individuos. La estimación de la biodiversidad se complica en regiones muy grandes o muy diversas, tal es el caso de las regiones tropicales

(Villanueva-Rivera et al., 2011). Debido a que es muy difícil realizar un inventario de todas las especies de un ecosistema, muchos estudios se basan solamente en uno o unos cuantos taxa para inferir la diversidad de un área; debido a esto se han desarrollado varios índices de diversidad los cuales buscan la extrapolación de datos basados en inventarios limitados (Magurran, 2004); sin embargo éstos índices aún necesitan de un gran esfuerzo de muestreo para producir estimaciones certeras (Sueur et al., 2008; Ström, 2013). Otra alternativa es la realización de evaluaciones rápidas de biodiversidad, las cuales pueden llevarse a cabo por parataxónomos quienes solamente identifican morfoespecies, sin embargo éstos métodos también requieren de muestreo y trabajo de identificación muy costoso (Sayre, 2000).

Una alternativa más rápida y económica para determinar biodiversidad, es analizar el sonido que emiten muchas especies de animales como aves, mamíferos, anfibios, peces y artrópodos, ya sea al moverse o deliberadamente para comunicarse o para detectar su medio ambiente (ecolocación) (Ranft, 2004). Las emisiones acústicas pueden ser grabadas fácilmente por medio de equipo especializado y pueden ser analizadas posteriormente.

Uno de los intentos para el análisis de la diversidad por medio de grabaciones de audio, ha sido el enfoque en un grupo taxonómico (por ejemplo aves o anfibios) y la posterior identificación por expertos, o por medio de software para reconocer especies (Acevedo & Villanueva-Rivera, 2006). Sin embargo la identificación auditiva es lenta y requiere de mucha práctica; por otro lado la detección automática de especies aún tiene algunas limitantes, por ejemplo requiere de estudios preliminares exhaustivos para la creación de reconocedores (Ström, 2013) y dichos reconocedores pueden no funcionar efectivamente en toda el área de distribución, debido a que hay variación en los sonidos emitidos en distintas regiones geográficas.

Además aún presenta problemas, especialmente en ambientes en donde hay muchos sonidos diferentes (Obrist et al., 2010; Townsey et al., 2013), tal es el caso de las regiones como los trópicos y subtrópicos.

Otro enfoque para analizar los sonidos es a nivel de “paisaje sonoro” (del inglés *soundscape*), definido como todas las señales acústicas en un paisaje (Schäfer, 1977). Según la Hipótesis del Nicho Acústico (Krause, 1987) el espectro sonoro es un recurso limitado y las especies han evitado el traslape de los sonidos que emiten, con los sonidos de otras especies o sea que entre mayor variedad de sonidos en un paisaje sonoro, se puede inferir que hay mayor cantidad de especies en el hábitat en donde fue grabado. Por medio de un análisis global a nivel de paisaje sonoro, se han creado algunos índices basados en la diversidad de sonidos presentes (Farina, 2014). Uno de estos índices, es el desarrollado por Sueur et al. (2008) el cual se basa en el índice de *Shannon-Wiener* (Magurran, 2004), al que llamaron Entropía Acústica (H); éste mide la heterogeneidad a través del espectro de frecuencia y la variación en la amplitud a través del tiempo. El índice H ha sido correlacionado exitosamente con simulaciones de diversidad (Sueur et al., 2008). También se han realizado algunas modificaciones a éste índice (Villanueva-Rivera et al., 2011; Depaetere et al., 2012), además se han desarrollado

algunos para medir la diversidad β y diversidad filogenética (Depaetere et al., 2012; Gasc et al., 2013) e incluso algunos enfocados en un grupo de fauna, como las aves (Pieretti et al., 2011).

Un análisis acústico de la comunidad animal puede ser utilizado para realizar una evaluación rápida de la diversidad animal local, lo cual ha sido sugerido con los resultados de algunos estudios (Depaetere, et al., 2012; Pieretti et al., 2011). Como es un método muy reciente, se ha recomendado que los índices sean probados en diferentes tipos de hábitat y comparados con evaluaciones de varios grupos de fauna (Sueur et al., 2008; Ström, 2013; Pieretti et al., 2011). En Guatemala existe un gran potencial para el uso de índices acústicos, ya que son útiles en áreas con gran diversidad de animales o cuando los recursos para estudios por medio de los métodos usuales son limitados.

Los objetivos de este estudio fueron describir la diversidad sonora mediante índices acústicos de diversidad en bosques de montaña con diversos niveles de perturbación y establecer la relación existente entre los resultados de los índices con el grado de cobertura vegetal. La hipótesis de la investigación fue que los índices reflejan las características de los bosques, según el grado de cobertura. Para esto se realizaron grabaciones de paisaje sonoro en cuatro áreas protegidas en regiones de montaña, localizadas en el occidente del país y un área de la ciudad capital. Se realizó una descripción del paisaje sonoro por medio del cálculo de seis diferentes índices acústicos, a partir de grabaciones realizadas por medio de equipo autónomo programable. También se realizó un análisis de uso del suelo para determinar el estado del hábitat y degradación, método utilizado en otros trabajos como el de Pijanowski et al. (2011). Los índices reflejaron una mayor diversidad en las áreas con mayor cobertura, tal como en otros estudios (Krause, 1987; Sueur et al. 2008; Depaetere, et al., 2012). Este trabajo constituye una base para que se realicen más investigaciones sobre paisaje sonoro en Guatemala, método que posee un gran potencial para el estudio y monitoreo ambiental en el país.

Materiales y métodos

Área de estudio

Las grabaciones de paisaje sonoro se realizaron en cinco áreas protegidas, tres se localizan en la cadena volcánica occidental, una en la Sierra de los Cuchumatanes y otra en el Cinturón Ecológico Metropolitano (CEM) (Figura 1). El área de los Cuchumatanes es muy diferente a las otras ya que su bosque es más disperso y el sitio del CEM es un área perturbada, también muy diferente a las otras cuatro zonas de estudio. El Cinturón Ecológico Metropolitano se ubica en la ciudad capital y las grabaciones se hicieron en el borde del barrano localizado entre la zona 14 y el municipio de Santa Catarina Pinula. En el Cuadro 1 se muestra la ubicación, zona de vida y tipo de bosque de cada área de grabación.

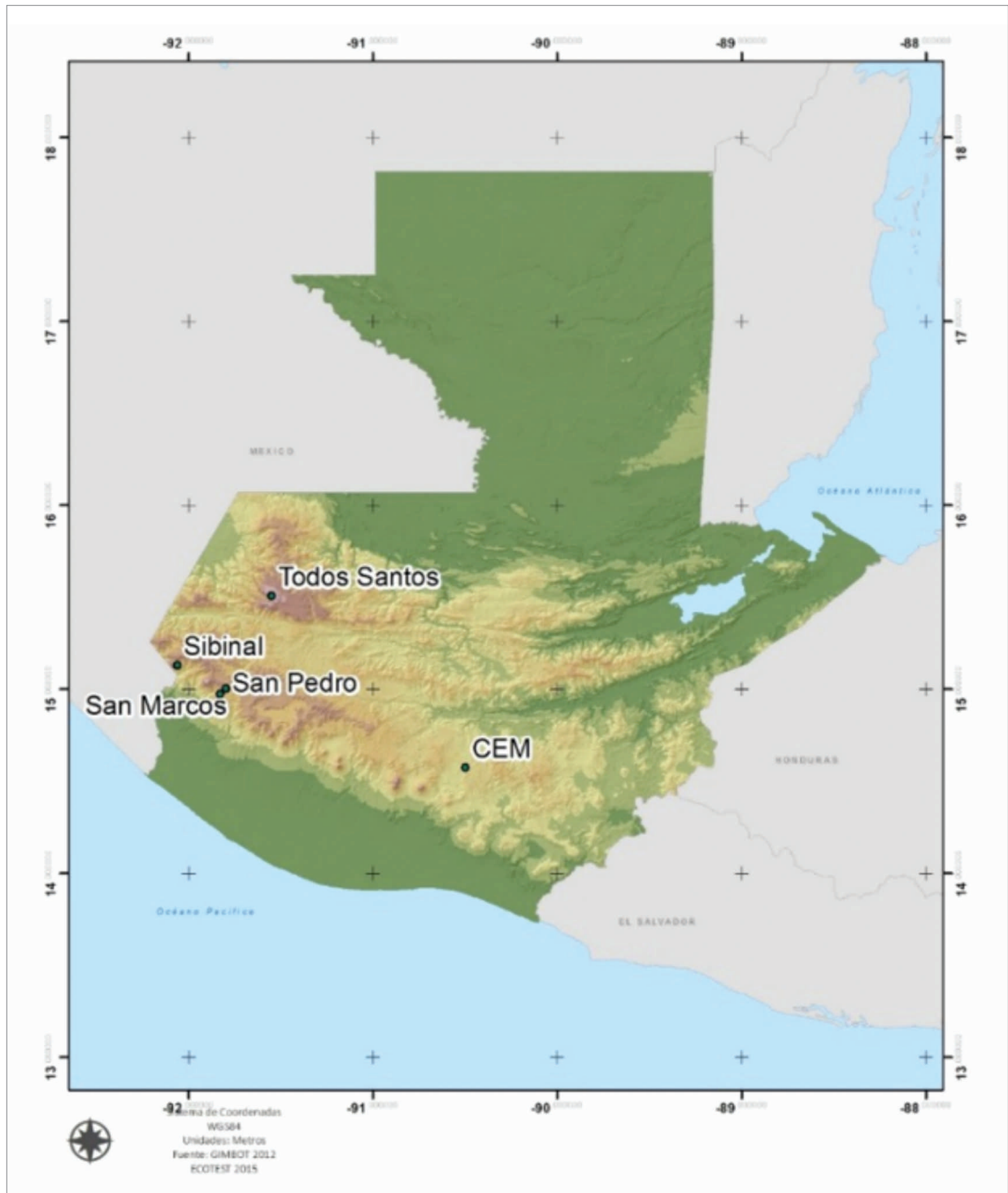


Figura 1. Ubicación de los sitios de grabación de paisaje sonoro. CEM: Cinturón Ecológico Metropolitano.

Cuadro 1: Descripción de las áreas de grabación de paisaje sonoro. PRM: Parque Regional Municipal.

Nombre Municipio y Departamento	Coordenadas y altitud	Zona de Vida	Estado de conservación del área y especies vegetales características
Cinturón Ecológico Metropolitano Ciudad de Guatemala	15.6920 -91.3019 1519 msnm	Bosque muy húmedo montano bajo subtropical	Muy perturbado <i>Quercus spp</i> <i>Bambusa spp</i> (introducido)
Canjalá Sibinal San Marcos	15.13388 -92.0624 2685 msnm	Transición entre Bosque Muy Húmedo Montano Bajo Subtropical y Bosque Muy Húmedo Montano Subtropical	Buen estado de conservación <i>Cupressus lusitánica</i> <i>Abies guatemalensis</i> <i>Pinus ayacahuite</i> <i>Pinus rudis</i> <i>Quercus spp</i>
Astillero de San Marcos San Marcos San Marcos	14.97611 -91.8314 2753 msnm	Bosque Muy Húmedo Montano Bajo Subtropical Con menor presencia de Bosque Muy Húmedo Montano Subtropical	Excelente estado de conservación <i>Cupressus lusitánica</i> <i>Oreopanax xalapensis</i> <i>Pinus ayacahuite</i>
Astillero de San Pedro San Pedro San Marcos	15.00619 -91.7986 3076 msnm	Bosque Muy Húmedo Montano Subtropical. Ecotono entre Bosques de Montaña y Selva de Montaña.	Buen estado de conservación <i>Cupressus lusitánica</i> <i>Abies guatemalensis</i> <i>Alnus spp</i> <i>Pinus rudis</i>
Todos Santos Cuchumatán Todos Santos Huehuetenango	15.51094 -91.5512 3685 msnm	Bosque Montano Alto Subtropical	Buen estado de conservación <i>Pinus hartwegii</i> <i>Juniperus standleyi</i>

Fuente: (Bolaños, Grajeda, López, & Secaira, 2015) (De la Cruz 1976). El estado de conservación se cuantificó por medio de un análisis de uso del suelo en 300 m alrededor de las grabadoras, en cada parque. CEM: Cinturón Ecológico Metropolitano.

Grabación de paisaje sonoro

Se utilizaron grabadoras automáticas modelo SM-III Wildlifeacoustics® instaladas en árboles a una altura de dos metros (Fotografía 1). Se tomó datos de un sitio de grabación en cada área, obteniendo grabaciones estéreo, durante cuatro días. Las grabadoras se programaron para grabar un minuto cada 10 minutos, método que ha sido utilizado en estudios similares (Ström, 2013). En total se obtuvieron 144 grabaciones en cada uno de los primeros tres días y al cuarto día se obtuvieron 140, lo que totalizó 572 grabaciones. El formato de grabación fue .wav (onda de audio, del inglés wave) a una tasa de muestreo de 48 kHz en estéreo (24 kHz para cada canal) y 16 bits de resolución. La grabadora se aseguró por medio de una cadena con candado. Las grabaciones se realizaron durante el mismo período (enero-febrero 2015) lo que permitió reducir al máximo las posibles diferencias causadas por los cambios en la tasa de vocalización a lo largo del año. Para el análisis posterior se utilizaron solamente las grabaciones entre las 06:00 y 08:00 h, por ser una hora de alta actividad vocal.

Estimación de la estructura del hábitat

Para describir el hábitat se realizó una cuantificación del uso del suelo en los sitios por medio de sistemas de información geográfica (SIG) utilizando imágenes satelitales de 2012 (GIMBOT, 2014). Este proceso se hizo en un círculo con un radio de 300 m alrededor de la grabadora, método utilizado por Pijanowski et al. (2011). Los diferentes usos del suelo fueron clasificados como: bosque, guamil, espacios abiertos, pastizal y urbano, según la clasificación establecida en el mapa de referencia utilizado (GIMBOT, 2014).

Descripción del paisaje sonoro

Para describir el paisaje sonoro se estimaron diversos índices, los cuales se calcularon por medio del programa R con los paquetes "seewave" (Sueur et al., 2014) y "soundecology" (Villanueva-Rivera et al. 2011). Para poder estimar el índice para varios archivos de sonido, se utilizó el paquete soundecology (Villanueva-Rivera et al., 2011). A continuación se describe cada índice utilizado.

- **Índice de Entropía (H)**

Se basa en la teoría de Shannon-Wiener (Magurran, 2004), que mide la información presente en un espectrograma, éste índice fue desarrollado por Sueur et al. (2008). Está compuesto por dos subíndices, el índice de entropía temporal (H_t) y el índice de entropía espectral (H_f), así, el índice de Entropía es el producto de estos dos subíndices ($H = H_f \times H_t$). Se cuantifica la heterogeneidad de la energía a través del tiempo, en una sección de grabación y la heterogeneidad de la energía por frecuencias en la misma sección. El índice de entropía ha sido probado en varios tipos de ecosistemas, pero se recomienda realizar más estudios comparándolo con otros sistemas de medición de diversidad, según reportan algunos científicos (Farina, 2014). La explicación matemática del índice de entropía se puede consultar en el trabajo de Sueur *et al.* (2008).

- **Índice de Diversidad Acústica (ADI)**

El índice de Diversidad Acústica (ADI) (Villanueva-Rivera et al., 2011) determina la proporción de valores de decibeles (dB) sobre un umbral de amplitud en cada banda de frecuencia. Ström (2013) llamó a éste índice, de Diversidad de Bandas (BD), el cálculo de los valores, también se basa en el índice de *Shannon-Wiener* (Magurran, 2004).

- **Índice de Complejidad Acústica (ACI)**

El índice de Complejidad Acústica (ACI) (Pieretti et al., 2011) produce una cuantificación directa y rápida de la estructura del paisaje sonoro. El ACI se basa en la hipótesis de que muchas biofonías¹, tal como las vocalizaciones de las aves, se caracterizan por una variación temporal intrínseca en su amplitud, en cambio muchas geofonías² y antropofonías³ presentan amplitudes constantes. El ACI calcula la diferencia absoluta entre dos valores adyacentes de amplitud espectral en una misma frecuencia. En otras palabras lo que mide éste índice es la complejidad del sonido, tomando en cuenta que los sonidos provocados por el hombre (autos, aviones, motosierras) son mucho más simples que los sonidos producidos por los animales. Para mayor detalle sobre los cálculos matemáticos, consultar el trabajo de Pieretti *et al.* (2011).

- **Índice de equidad (evenness)**

Este mide la distribución del índice ACI, a través de cada clase de frecuencia. Se basa en el índice de equidad de *Gini*, ampliamente utilizados en ecología para calcular la biodiversidad de un sitio (Gasc et al., 2013). Este índice mide qué tan equitativamente distribuidos se encuentran los sonidos biofónicos en una grabación. El índice de equidad argumenta que si todas las especies en una muestra presentan la misma abundancia, el índice usado para medir la equidad debería ser mínimo y



Fotografía 1. Instalación de grabadora automática SM-III Wildlifeacoustics® en Todos Santos Cuchumatán.

debería aumentar a medida que las abundancias relativas se hagan menos equitativas. Para este caso el índice toma las especies como biofonía en diversas frecuencias, tomando en cuenta frecuencias, en lugar de especies. Para obtener una explicación detallada de los principios matemáticos de éste índice, consultar el trabajo de Villanueva-Rivera *et al.* (2011).

- **Índice Bioacústico**

Se calcula como el área bajo de cada curva que incluye todas las bandas de frecuencia asociadas al “valor de dB mayor que al mínimo valor de dB para cada curva”. Por lo tanto los valores de área son una función del nivel de sonido y del número de bandas de frecuencia utilizadas por la avifauna. Para obtener una explicación detallada consultar el trabajo de Boelman *et al.* (2007).

- **Índice de diferencias normalizadas en el paisaje sonoro (NDSI)**

Fue desarrollado por Kasten *et al.* (2012) y consiste en realizar un cálculo del nivel de perturbación antropogénica en el paisaje sonoro, por medio de un análisis de la proporción de antropofonía con respecto a la biofonía. Los sonidos generados por el hombre como los motores generan frecuencias predominantemente bajas, en cambio, en los sonidos de animales predominan las frecuencias más altas, es por eso que es posible calcular estas proporciones y así determinar la perturbación en el sitio (Pijanowski et al., 2011). Para una explicación detallada y su base matemática, consultar el trabajo de Kasten et al. (2012).

¹ Biofonía: sonido en un paisaje sonoro, emitido por seres vivos (Pijanowski et al., 2011)

² Geofonía: sonido emitido por fenómenos geológicos tal como el viento, la lluvia, etc.

³ Antropofonía: sonido proveniente de actividades del ser humano, como automóviles, aviones, etc.

Métodos de análisis

Se promediaron los índices de los dos canales de cada grabación estéreo; se seleccionaron 48 grabaciones obtenidas entre las 06:00 y las 08:00 h, por cuatro días ($n=48$), con las cuales se realizó un escalamiento multidimensional no-métrico (NMDS), utilizando el índice de similitud de *Bray Curtis*. Esto permitió determinar el grado en que influye cada índice obtenido para representar a cada sitio. Se realizó una prueba de *Shapiro Wilk* con lo cual se determinó que los datos no tuvieron una distribución normal, por lo que se realizó un test de *Kruskal-Wallis* para determinar si había diferencia significativa entre los datos obtenidos para cada lugar con cada índice acústico. Se realizaron gráficas de caja para visualizar los resultados. El análisis de NMDS se realizó por medio del programa Past, para todos los demás cálculos (*Shapiro Wilk*, *Kruskal-Wallis* y *gráficas de caja*) se utilizó el programa R (R Core Team, 2014).

Resultados y discusión

La distribución de los datos no fue normal, según el test de *Shapiro Wilk* ($H p=2.2e-16$, $ADI p=2.474e-16$, $ACI p=2.2e-16$, *Evenness* $p=2.352e-09$, *Bioacoustic* $p=6.812e-09$, $NDSI p<1.214e-09$).

El test de *Kruskal-Wallis*, mostró diferencias significativas entre sitios ($H p=2.2e-16$, $ADI p=2.2e-16$, $ACI p=2.2e-16$, *Evenness* $2.2e-16$, *Bioacoustic* $p<6.891e-06$, $NDSI p<2.2e-16$, $n=48$).

En el Cuadro 2 se presenta el promedio de los valores obtenidos para cada área y en la Figura 2 se muestran las gráficas de caja generadas para los índices obtenidos.

El análisis de NMDS muestra que entre los índices calculados, el NDSI, el índice Bioacústico y el ADI son los que permiten diferenciar mejor los sitios por medio del paisaje sonoro. En el Cuadro 3 se muestran los valores de R^2 obtenidos para cada índice, dato que representa el grado de asociación, o representatividad de los índices para poder describir a los paisajes sonoros.

El análisis de uso del suelo para cada sitio de grabación se presenta en el Cuadro 4. El sitio mejor conservado es San Marcos, luego San Pedro y Sibinal. El sitio de grabación ubicado en Todos Santos está en excelente estado, pero su bosque es disperso de forma natural (Bolaños, 2015). El sitio más perturbado es el CEM, debido a que cuenta también con urbanización.

En la Figura 3 se muestran espectrogramas de paisaje sonoro representativos de cada sitio de grabación. Estas gráficas muestran en el eje vertical las frecuencias de los sonidos en kHz y en el eje horizontal se indica el tiempo en s. Los sonidos antropogénicos, como motores de automóviles o industria son graves y constantes en el tiempo, se observan en la parte inferior del espectrograma. La mayoría de las frecuencias de los sonidos de animales como aves, se ubican en un rango entre 1 y 8 kHz.

Cuadro 2. Promedio de los valores obtenidos para los índices en cada área. CEM: Cinturón Ecológico Metropolitano. Los tonos más oscuros indican mayor diversidad acústica y mayor calidad ambiental, el blanco representa la menor diversidad acústica y calidad ambiental.

Lugar	H	ADI	Evenness	Bioacoustic	ACI	NDSI
San Marcos	0.770195	1.934881	0.391218	3.311737	1805.896	0.523412
Sibinal	0.744892	1.786801	0.468799	2.725179	1805.741	0.408118
San Pedro	0.724229	1.459622	0.546145	2.434465	1812.161	0.457124
CEM	0.693095	1.729762	0.52705	2.918697	1809.272	-0.15944
Todos Santos	0.677047	0.773142	0.711965	0.585318	1794.785	0.565346

Cuadro 3: Valores de R^2 para cada índice, obtenidos por medio del NMDS (estrés=0.09533). Los valores más altos de R^2 (asociación) indican que los índices describen mejor a cada sitio.

Índice	Eje 1	Eje 2
H	0.05154	0.51673
ADI	-0.40935	-0.59726
ACI	-0.32382	-0.34512
Evenness	0.21628	0.55520
Bioacoustic	-0.54197	-0.72241
NDSI	0.90732	-0.19796

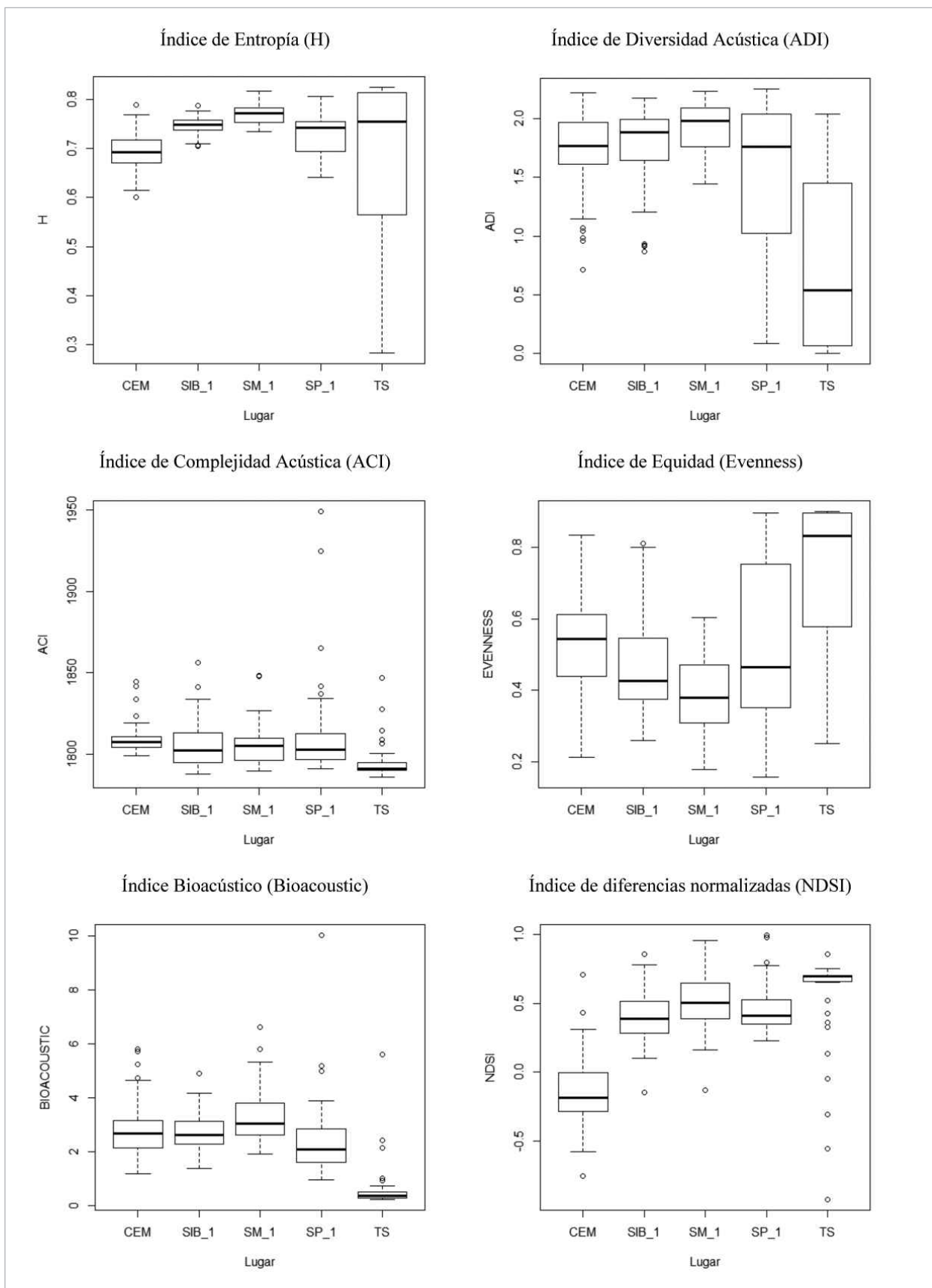


Figura 2. Gráficas de caja para los índices de 06:00 a 08:00 h durante 4 días (n=48). CEM: Cinturón Ecológico Metropolitano, SIB_1: Sibinal, SM_1: San Marcos, SP: San Pedro, TS: Todos Santos.

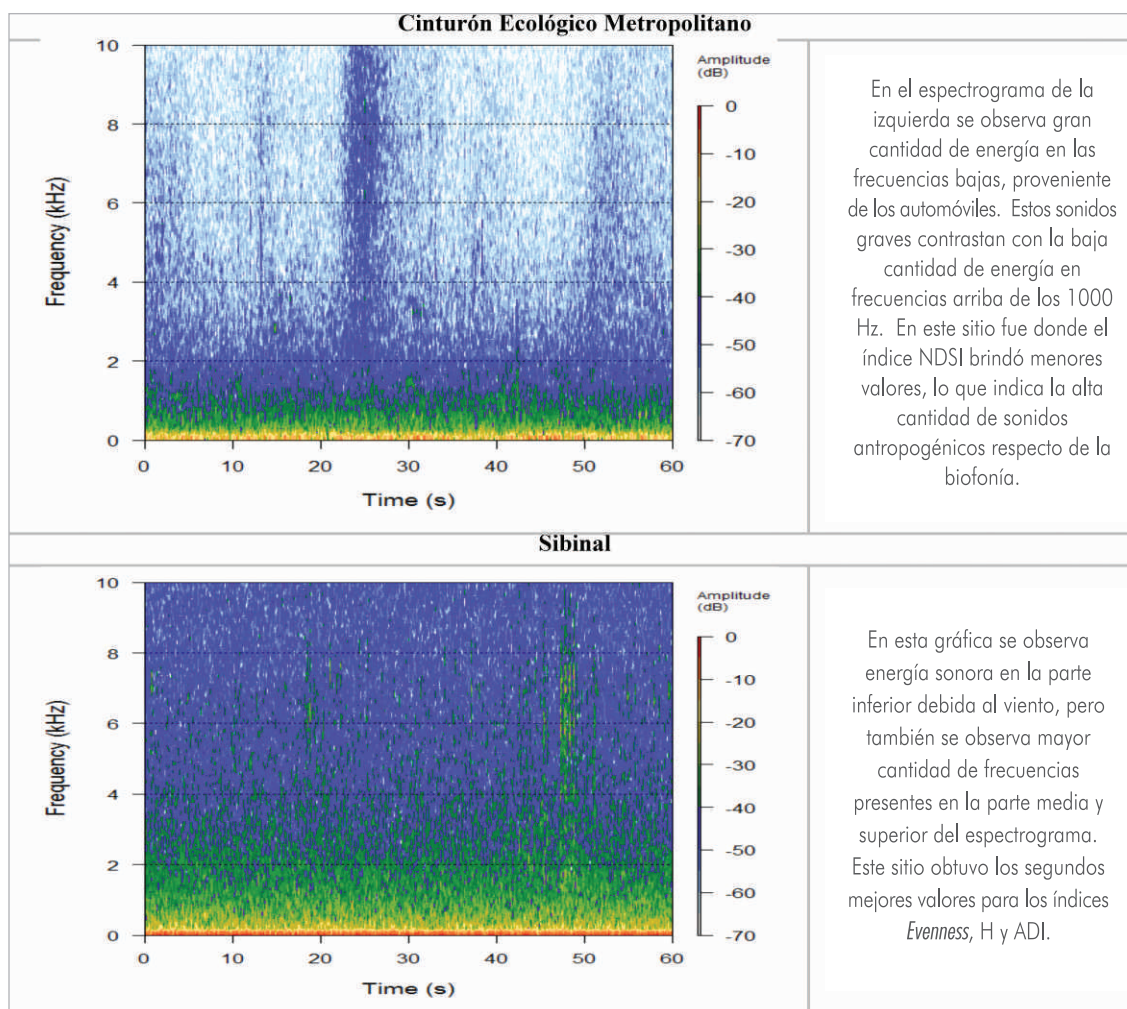
Los índices obtenidos muestran una similitud mayor entre San Marcos, Sibinal y San Pedro, que comparados con los sitios de Todos Santos y el CEM, tal como era lo esperado, tomando en cuenta las características ambientales y ecosistémicas de los sitios (ver Cuadro 1). La similitud puede deberse a que los primeros tres sitios tienen una variación de altitud entre sí menor (de 50 a 300 metros); que con los otros dos sitios, el CEM y Todos Santos (600 m abajo y 1000 m arriba de los tres primeros respectivamente). Sibinal, San Marcos y San Pedro poseen tipos de bosque y estados de conservación parecidos, según el análisis de uso del suelo realizado, el sitio de San Marcos tiene un 100% de bosque, San Pedro tiene un 98.11% de bosque y Sibinal tiene 97.76% (Cuadro 4).

El índice que obtuvo un mayor valor de asociación (R^2), por medio del análisis de NMDS, fue el NDSI (Cuadro 3); éste índice

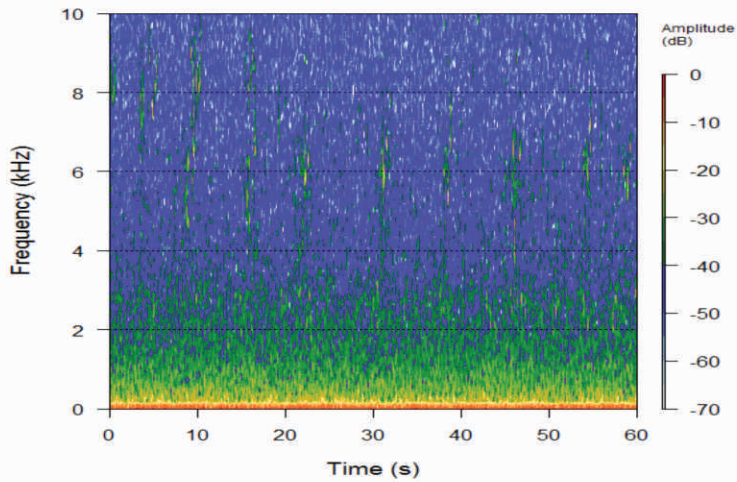
refleja la proporción de sonidos de baja frecuencia, respecto a sonidos de frecuencias más altas (Kasten et al., 2012). Los sonidos de baja frecuencia se asocian a antropofonía, causada principalmente por los sonidos de motores. Éste índice tuvo un resultado mucho menor en el CEM, lo cual es debido al sonido provocado por motores en la ciudad de Guatemala. El análisis de uso del suelo indica que el sitio del CEM solamente tiene 31.96% de cobertura forestal, mientras que 55.36% corresponde a uso urbano y 12.68% es bosque secundario (localmente llamado guamil).

Otro índice cuya asociación fue alta según el análisis de NMDS fue el Bioacústico. Este índice mide la cantidad de energía o sonidos en las bandas de frecuencia mayormente abarcadas por las vocalizaciones de la avifauna (Boelman et al., 2007). Este índice fue mayor en el área de San Marcos, sitio que también

Figura 3. Espectrogramas de los paisajes sonoros de los sitios de grabación. Espectrogramas creados por medio del programa R, con el paquete Seewave. 512 FFT. Los sonidos con mayor energía (más volumen) se observan de color rojo, en amarillo y verde se observan los intermedios, en azul los de baja energía y el blanco indica la ausencia de sonido.

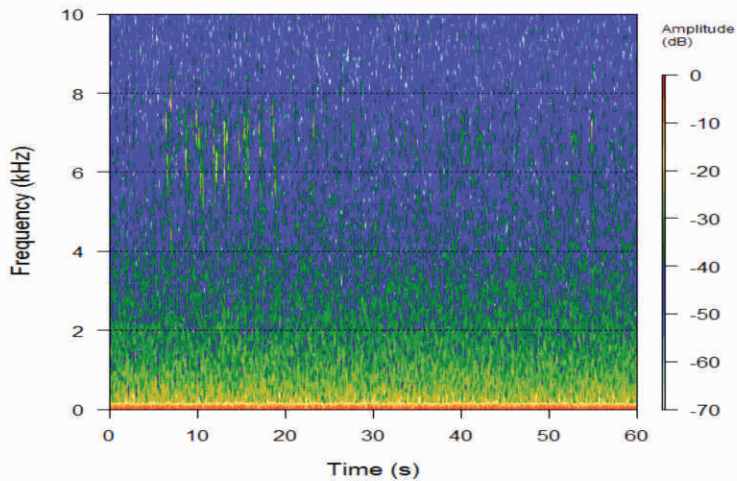


San Marcos



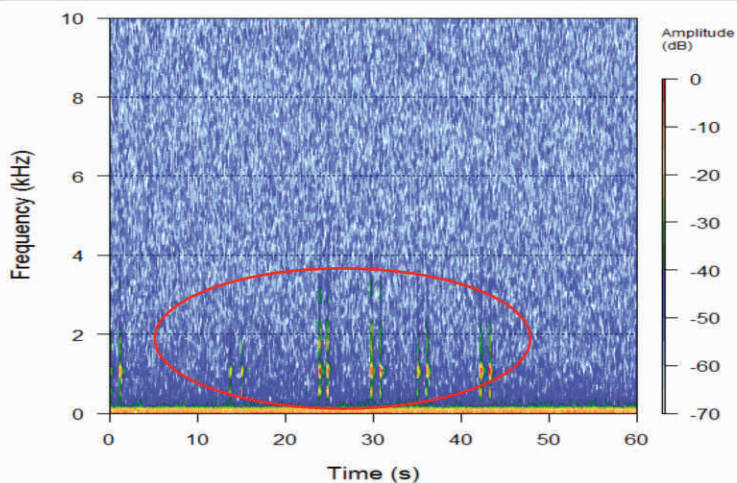
Este sitio fue el que obtuvo mejores valores para la mayoría de índices (H, ADI, *Evenness* y *Bioacoustic*). Es el área con bosque en mejor estado, de las evaluadas, según la cuantificación de la cobertura forestal. En la gráfica se puede ver que existe sonido presente en varias bandas de frecuencia distintas.

San Pedro



Esta área obtuvo valores bajos para la mayoría de índices. El sitio donde estaba ubicada la grabadora tenía árboles mayormente de ciprés.

Todos Santos Cuchumatán



El área de Todos Santos fue la menos diversa según todos los índices evaluados. Sin embargo, para el NDSI obtuvo el mejor valor, lo que indica que tiene muy poca antropofonía. Una de las especies de aves presentes, fue *Corvus corax*, cuyo llamado se señala en el espectrograma. Se puede apreciar que este es el único sonido de animal presente en esta grabación.

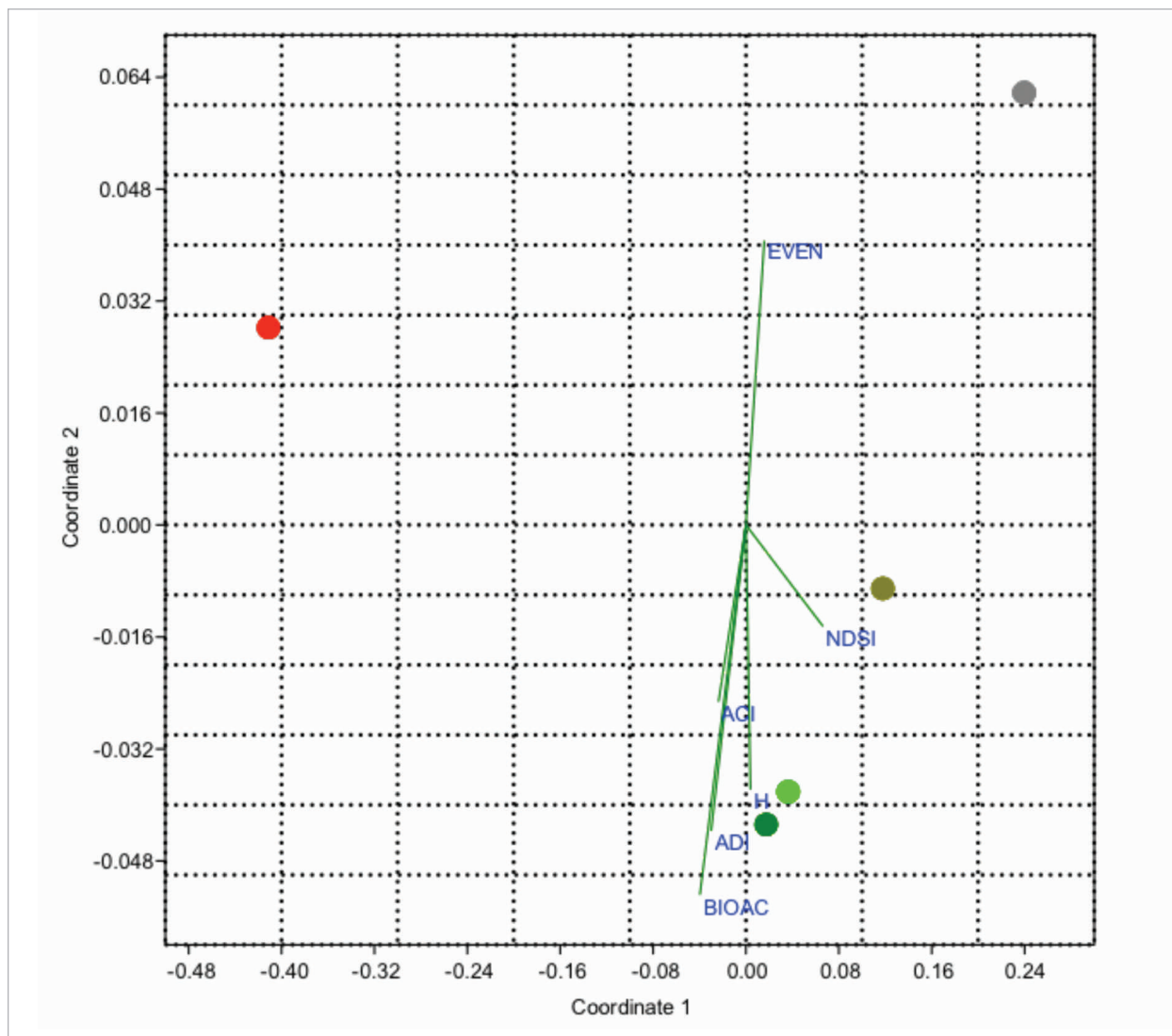


Figura 4. Gráfica de análisis de NMDS para los índices evaluados. Los colores corresponden a los sitios: CEM, Sibinal, San Marcos, San Pedro, Todos Santos. Los índices se abreviaron de la forma siguiente: EVEN: evenness, NDSI: índice de diferencias normalizadas del paisaje sonoro, AGI: índice de complejidad acústica, ADI: índice de diversidad acústica, Bioac: índice bioacústico.

resultó ser el que posee bosque en mejor estado de conservación según las observaciones en campo y se refleja también en la cuantificación de la cobertura por medio de SIG, con un 100% de bosque (Cuadro 4).

El siguiente índice con mayor asociación según el análisis de NMDS, fue el ADI, el cual tuvo un menor valor en Todos Santos, este sitio es el de mayor elevación de los cinco evaluados, el tipo de bosque ha sido considerado como subalpino (Villar-Anleu, 1998) y durante las grabaciones se registraron temperaturas mínimas de -4°C . El bosque del área se compone mayormente de árboles de la especie *Pinus hartwegii* y de arbustos de la especie *Juniperus standleyi*, muy espaciados entre sí. Las condiciones ambientales del área y características del bosque podrían provocar que la diversidad de fauna sea baja (Bolaños et al., 2015) lo cual se refleja en el bajo valor en el ADI. El siguiente sitio con

menor valor ADI fue el CEM, lo cual era lo esperado ya que el área se encuentra bastante perturbada e intervenida y se ubica en los alrededores de la ciudad de Guatemala. Los sitios con mayores valores de ADI son San Marcos, Sibinal y San Pedro, en orden de mayor a menor, esto era lo esperado ya que de estos tres, San Pedro y Sibinal son sitios con un estado de conservación parecido (98.11% y 97.76% de bosque respectivamente). El sitio en donde se ubicó la grabadora en San Pedro es una plantación de ciprés, en Sibinal la grabadora se ubicó en un bosque natural y el sitio de San Marcos es el que se encuentra en mejor estado de conservación.

El tercer índice en representar mejor las diferencias entre sitios según el análisis NMDS, fue el *Evenness* (equidad). Este índice también mostró resultados coherentes de acuerdo a los demás índices ya que San Marcos fue el sitio con mayor Equidad según

este índice, el cual mide la cantidad de energía correspondiente a animales vocalizando en cada banda de frecuencia (entre más cercano a cero es el valor, existe una mayor equidad). Entre más equidad hay en un ecosistema, quiere decir que el ecosistema está en mejores condiciones (Villanueva-Rivera et al., 2011). Los valores obtenidos muestran que el sitio más diverso es San Marcos, luego Sibinal, después San Pedro, luego el CEM y por último Todos Santos. El sitio de Todos Santos, tiene una cobertura de 99.94% de espacios abiertos con bosque o sin bosque, según la cuantificación de uso del suelo (GIMBOT, 2014). Esto se debe a que el ecosistema allí es un bosque montano alto subtropical (según Holdridge), que ha sido catalogado incluso como bosque subalpino, parecido al de mayores latitudes (Villar-Anleu, 1998). Este sitio es el que tiene menor diversidad entre los ecosistemas evaluados, aunque su estado de conservación es bueno.

El índice de entropía (H) no mostró valores de asociación elevados para poder describir el paisaje sonoro de los sitios según el NMDS. En la Figura 2 se evidencia que los valores obtenidos con éste índice tienen una variación más alta para el sitio de

Todos Santos, en cambio para los demás lugar es la variación no fue tan elevada; el sitio con mayor diversidad fue nuevamente San Marcos, luego Sibinal, después San Pedro y de último el CEM. Según este índice Todos Santos sería el segundo lugar con más diversidad entre los sitios, pero la alta variación en los datos generados, podría indicar que este índice no es apto para establecer conjeturas sobre la diversidad en este lugar. Según Sueur *et al.* (2008) la entropía en las frecuencias no es adecuada para grabaciones realizadas en bosques de lugares templados, en donde la actividad acústica es baja y con ruido ambiental. El bosque de las partes altas de Todos Santos, tal como donde se realizaron las grabaciones, muestra características típicas de ecosistemas de mayores latitudes, esta podría ser la razón de la elevada variación que mostraron los datos del índice de entropía en este sitio.

El índice que mostró representar menos las características del paisaje sonoro de los sitios evaluados fue el ACI, según el análisis de NMDS. Este índice fue creado para evaluar la diversidad de sonidos generados por aves, respecto del ruido antropogénico.

Cuadro 4. Análisis de uso del suelo en los sitios de grabación de paisaje sonoro. El bosque de Todos Santos está clasificado en el mapa de referencia (GIMBOT, 2014) como “espacios abiertos con poco o sin bosque”, sin embargo hay que tomar en cuenta que así es el hábitat natural del área (Villar-Anleu, 1998).

Sitio	Uso	m ²	%
Cinturón Ecológico Metropolitano Ciudad de Guatemala	Bosque	90,264.52	31.96
	Urbano	156,380.80	55.36
	Matorral o guamil	35,823.84	12.68
	Pastizales	0.0	0.00
	Total	282,469.20	100.00
Canjalá Sibinal San Marcos	Bosque	276,021.60	97.76
	Urbano	0.00	0.00
	Matorral o guamil	6,300.19	2.23
	Pastizales	25.00	0.01
	Total	282,346.80	100.00
Astillero de San Marcos San Marcos San Marcos	Bosque	282,561.20	100.00
	Urbano	0.00	0.00
	Matorral o guamil	0.00	0.00
	Pastizales	0.00	0.00
	Total	282,561.20	100.00
Astillero de San Pedro San Pedro San Marcos	Bosque	277,015.40	98.11
	Urbano	0.00	0.00
	Matorral o guamil	5,335.53	1.89
	Pastizales	0.00	0.00
	Total	282,351.00	100.00
Todos Santos Cuchumatán Todos Santos Huehuetenango	Bosque ¹	282,313.40	99.94
	Urbano	0.00	0.00
	Matorral o guamil	166.50	0.06
	Pastizales	0.00	0.00
	Total	282,479.90	100.00

Según los resultados de este estudio, el sitio con una mayor diversidad fue el CEM, luego San Marcos, después Sibinal y de último Todos Santos. Este último sitio fue el que presentó menores valores, lo cual es lógico tomando en cuenta la baja diversidad de aves en el sitio (Bolaños et al., 2015) sin embargo no concuerda con los demás índices de diversidad (excepto NDSI) los cuales mostraron que San Marcos era el sitio con mayor diversidad. Podría ser que la altitud influya ya que a menor altitud se sabe que hay una mayor diversidad de aves y el CEM es el sitio con menor altitud de todos los evaluados.

Se pudo observar que los índices ADI, H, *Bioacoustic* y *Evenness*, muestran resultados que concuerdan entre sí, ya que indican que el sitio de San Marcos es el más diverso. El ACI muestra que San Marcos es el segundo en diversidad, luego del CEM, pero al igual que con los otros índices, Todos Santos es el que tiene menor valor, lo cual era lo esperado. Por último, el índice NDSI indica que el sitio con mayor ruido antropogénico es el CEM, lo cual es coherente ya que este sitio es el más perturbado de todos, debido a que se encuentra en la ciudad de Guatemala.

Conclusiones

- Todos los índices acústicos muestran diferencias estadísticamente significativas entre los sitios.
- Los índices acústicos que describen mejor los sitios son, en orden de eficiencia decreciente: NDSI, bioacoustic y ADI.
- El sitio que muestra una mayor perturbación sonora fue el CEM, lo cual concuerda con el uso del suelo observado.
- El sitio con hábitat mejor conservado según los índices, fue San Marcos, lo cual es consistente con el análisis de uso del suelo.
- Aunque se requieren más estudios para la poder utilizar índices acústicos para estimar biodiversidad en los trópicos y subtrópicos, de acuerdo a los resultados obtenidos, se concluye que el análisis de paisaje sonoro es eficiente para describir el estado y biodiversidad de los ecosistemas.
- Para describir un hábitat en función del paisaje sonoro es recomendable la utilización de varios índices, en lugar de uno solo, ya que todos tienen ventajas y desventajas, según el tipo de ecosistema evaluado.

Agradecimiento

Este trabajo contó con la ayuda de Margarita Vides para la creación de los mapas. La toma de datos en campo contó con la colaboración de Esteban Matías y Rita de León. El equipo de grabación fue proporcionado por Ecotest de Guatemala.

Bibliografía

- Acevedo M., Villanueva-Rivera L. (2006) *Using automated digital recording systems as effective tools for the monitoring of birds and amphibians* BioOne 34 (1) :211-214.
- Agranat I. (2007) *Automatic detection of Cerulean Warblers*. Wildlife Acoustics.
- Boelman N., Asner G., Hart P., Martin R. (2007) *Multi-trophic invasion resistance in Hawaii: bioacoustics, field surveys and airborne remote sensing* Ecological Applications 17: 2137-2144.
- Bolaños P., Grajeda L., Lopez E., Secaira S. (2015) *Línea base, diseño e implementación de una estrategia de monitoreo de especies indicadoras y programa de capacitación para implementar los monitoreos en áreas piloto. Fase II Guatemala*: CONAP.
- Depraetere M., Pavoine S., Jiguet F., Gasc A., Duval S., Sueur J. (2012) *Monitoring animal diversity using acoustic indices: Implementation in a temperate woodland* Ecological Indicators 13: 45-54.
- Farina A. (2014) *Soundscape Ecology* Urbino, Italy: Springer.
- Gasc A., Sueur J., Jiguet F., Grandcolas P., Burrow C., Pavoine S. (2013) *Assessing biodiversity with sound: Do acoustic diversity indices reflect phylogenetic and functional diversities of bird communities* Ecological Indicators 25: 279-287.
- GIMBOT (2014) *Mapa de Bosques y Uso de la Tierra 2012 Guatemala: Grupo Interinstitucional de Monitoreo de Bosques y Uso de la Tierra*.
- Kosten E., Stuart A., Gageb H., Foxc J., & Wooyeong J. (2012) *The remote environmental assessment laboratory's acoustic library: An archive for studying soundscape ecology* Ecological Informatics 12: 50-67.
- Krause B. (1987) *The Niche Hypothesis: How Animals Taught Us to Dance and Sing*.
- Ludwing J., Reynolds J. (1988) *Statistical Ecology* Wiley-Interscience publication.
- Magurran A.E. (2004) *Measuring Biological Diversity* Malden, MA.
- Obrist M., Pavan G., Sueur J., Riede K., Ilusja D., Márquez R. (2010) *Bioacoustics approaches in biodiversity inventories: Manual of field recording techniques and protocols for all taxa biodiversity inventories and monitoring* ABC Taxa 8 (1): 68-99.
- Pieretti N., Farina A., 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.
- Pijanowski B., Villanueva-Rivera L., Dumyahn S., Farina A., Krause B., Napoletano B., Pieretti N. (2011) *Soundscape Ecology: The Science of Sound in the Landscape* BioScience, 61: 203-216.
- R Core Team (2014) *R: A language and environment for statistical Computing* Vienna, Austria. Retrieved from <http://www.R-project.org>.
- Ranft R. (2004) *Natural Sound Archives: past present and future* Anais da Academia Brasileira de Ciencias 76 (2): 455-465.
- Sayre R. (2000) *Un enfoque en la naturaleza: evaluaciones ecológicas rápidas* The Nature Conservancy.
- Schäfer R. (1977) *The tuning of the world* Alfred Knopf.
- Ström C. (2013) *Rapid biodiversity assessment of a Neotropical rainforest using soundscape recordings* Degree Thesis in Ecology 32 Umea, Suecia: Umea Universitet.
- Sueur J., Aubin T., Simonis C. (2014) *Package "Seewave"* Paris: Musee National D'Histoire Naturelle.
- Sueur J., Pavoine S., Hamerlynck O., Duval S. (2008) *Rapid Acoustic Survey for Biodiversity Appraisal* PLoS ONE 3 (12): e4065 doi:10.1371/journal.pone.0004065.
- Sutton D. (1999) *Fundamentos de Ecología* Editorial Limusa, S.A. de C.V.
- Townsey M., Wimmer J., Williamson I., Roe P. (2014) *The use of acoustic indices to determine avian species richness in audio-recordings of the environment* Ecological Informatics 21: 110-119.
- Villanueva-Rivera L., Pijanowski B., Doucette J., Pekin B. (2011) *A primer of acoustic analysis for landscape ecologists* Landscape Ecology 26:1233-1246.
- Villar-Anleu L. (1998) *La Flora silvestre de Guatemala* Guatemala: Editorial Universitaria.