



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**Influencia del tipo de grabadora en los índices
acústicos para análisis automático de cambios en
ecosistemas**

Autor

Jessica Tatiana Loaiza Mora

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería

Electrónica

Medellín, Colombia

2021



Influencia del tipo de grabadora en los índices acústicos para análisis automático de cambios
en ecosistemas

Jessica Tatiana Loaiza Mora

Trabajo de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniera Electrónica

Asesora

Claudia Victoria Isaza Narváez, PhD.
Profesora Titular Universidad de Antioquia

Línea de Investigación:
Inteligencia Computacional
Grupo de Investigación:
SISTEMIC

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Departamento de ingeniería electrónica
Medellín, Colombia
2021.

Contenido

Contenido.....	2
Lista de figuras	3
Lista de tablas.....	3
Resumen	4
Introducción	5
Objetivos.....	6
General.....	6
Específicos	6
Marco Teórico	7
Índices acústicos	7
Índices acústicos analizados	7
Audiomoth	10
SM4	10
Metodología	11
Base de datos	11
Metodología usada	11
• Estimación de los índices.....	12
• Análisis Espectral.....	13
• Análisis externo Audiomoth y SM4.....	13
• Clasificación de los índices	13
• Índices con preprocesamiento de los audios	13
Resultados y análisis	13
Conclusiones	24
Referencias Bibliográficas	24
Anexo	27

Lista de figuras

FIGURA 1. ETAPAS DEL PROYECTO PARA IDENTIFICAR VARIACIONES EN LOS ÍNDICES ACÚSTICOS ENTRE SM4 Y AUDIOMOTH.....	12
FIGURA 2. INTERFAZ APLICATIVO PYTHON PARA CALCULAR VALOR DE LOS ÍNDICES	12
14	
FIGURA 3. DIFERENCIA PORCENTUAL DEL COMPORTAMIENTO DE LOS ÍNDICES ENTRE AUDIOMOTH Y SM4.....	14
FIGURA 4. DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA PROMEDIADA EN EL LUGAR G21.....	14
FIGURA 5. ESPECTROGRAMA PROMEDIO DE LA GRABADORA SM4 EN LA ZONA G21	15
FIGURA 6. ESPECTROGRAMA PROMEDIO DE LA GRABADORA AUDIOMOTH EN LA ZONA G21.....	15
FIGURA 7. ESPECTROGRAMA COMPARATIVO DE LA AUDIOMOTH CON CAJA, SIN CAJA Y SM4.....	16
FIGURA 8. GRÁFICA COMPARATIVA ÍNDICES FILTRADOS (500HZ A 11KHZ) CON Y SIN NORMALIZACIÓN DE LOS ÍNDICES (A) RMS TODOS LOS AUDIOS; (B) RMS TODOS LOS AUDIOS CON NORMALIZADA; (C) RMS TODOS LOS AUDIOS; (D) RMS TODOS LOS AUDIOS CON NORMALIZADA	17
18	
FIGURA 9. GRÁFICA DE ADIM1 A 4. A) ADIM1 (0 HZ A 1 KHZ); B) ADIM2 (1 KHZ A 2 KHZ); C) ADIM3 (2 KHZ A 3 KHZ); D) ADIM4 (3 KHZ A 4 KHZ)	18
FIGURA 10. GRÁFICA COMPARATIVA AUDIO EN EL TIEMPO PROMEDIADA. A) GRABACIONES DEL DÍA 2019/05/20; B) GRABACIONES DEL DÍA 2019/05/29	19
FIGURA 11. GRÁFICA COMPARATIVA AUDIO EN EL TIEMPO PROMEDIADA DÍA 2019/05/29. A) GRABACIONES CON LLUVIA; B) GRABACIONES SIN LLUVIA	20
FIGURA 12. ÍNDICES TODOS LOS AUDIOS CON LLUVIA Y SIN LLUVIA. A) NDSI CON LLUVIA; B) NDSI SIN LLUVIA; C) ESV CON LLUVIA; D) ESV SIN LLUVIA.....	21
FIGURA 13. GRÁFICA COMPARATIVA DE ADI CON LLUVIA Y SIN LLUVIA, EN TODAS LAS FRECUENCIAS Y FILTRANDO DE 500 HZ A 11 KHZ Y 3 KHZ A 11 KHZ.....	22
FIGURA 14. DIAGRAMA DE BLOQUES PARA COMPARACIÓN DE ÍNDICES ENTRE AUDIOMOTH Y SM4.....	23

Lista de tablas

TABLA 1. ÍNDICES ACÚSTICOS TOMADO Y MODIFICADO DE (DUQUE-MONTOYA, 2018) ^[11]	7
TABLA 2. PARÁMETROS DE GRABACIÓN DE CADA GRABADORA.....	11
TABLA 3. DISTRIBUCIÓN LUGARES DE GRABACIÓN.....	11
TABLA 4. RESULTADO DETECCIÓN AUDIOS CON LLUVIA LUGAR G21.	19
TABLA 5. RESULTADO DETECCIÓN AUDIOS CON LLUVIA LUGAR G60.	20

Resumen

En este proyecto de investigación se identificaron las causas que generan diferencia entre los valores de 34 índices acústicos. La diferencia de valores de los índices ocurre cuando éstos se estiman a partir de audios grabados con dos grabadoras de diferente tipo, una de alto costo (SM4) y otra de bajo costo (Audiomoth). Los audios usados en la investigación fueron grabados en el mismo espacio y tiempo. Para estimar los índices de las grabaciones, se adaptó un aplicativo desarrollado en Python. Con los valores estimados se hicieron gráficas que permitieron comparar entre ambas grabadoras y así ir separando el procesamiento que se le debió hacer a los audios. Una vez identificadas los motivos que generaron la diferencia de los valores, se agruparon los índices de acuerdo con sus características comunes, además, se plantearon alternativas para hacerlos comparables cuando se requiere analizar grabaciones obtenidas con los dos tipos de grabadoras. Esta investigación se constituye en una guía para conocer bajo que lineamientos los índices acústicos son comparables entre ambas grabadoras.

Palabras clave: Audiomoth, SM4, índices acústicos



Introducción

La Audiomoth es una grabadora de bajo costo desarrollada por un grupo de investigación de la Universidad de Southampton y lanzada en el 2017 como un sistema embebido útil para hacer análisis acústico de ecosistemas. Esta grabadora se presenta como una buena alternativa para hacer monitoreo acústico de la biodiversidad, sin embargo, en proyectos donde ya se utilizaron otro tipo de grabadoras como la SM4, la cual es considerada *gold standard*, no era posible saber si las grabaciones serían comparables al momento de estimar índices acústicos. El grupo SISTEMIC en compañía del grupo Herpetológico de Antioquia GHA, ambos de la Universidad de Antioquia, habían realizado estudios previos en los que comparaban la ganancia de ambas grabadoras, realizaron grabaciones en ambientes controlados y no controlados y de este estudio seleccionaron cual caja protectora era la más indicada para Audiomoth y así hacer grabaciones en espacio abierto, como bosques húmedos, sin afectar la calidad de la grabación ni daños por las condiciones ambientales. Adicionalmente hay estudios que comparan distintos tipos de cajas en la Audiomoth y comparan el efecto sobre las ganancias de la señal. Identificando que hay variación entre las cajas que se utilicen para proteger a la grabadora. Sin embargo, no se había investigado si al cambiar de una SM4 a una Audiomoth los valores en los índices acústicos serían comparables, por esta razón, en este trabajo de investigación se hizo un análisis de 34 índices acústicos utilizando una base de datos con grabaciones de ambas grabadoras que fueron ubicadas en el mismo lugar y grabaron al tiempo. Inicialmente se calcularon los índices con un aplicativo desarrollado en Python y al observar la notoria diferencia se realizó un análisis frecuencial, de ganancia y espectral para verificar las diferencias entre las señales de cada grabadora, se hizo un análisis separado cuando hay audios con lluvia y sin lluvia. Con este análisis se identificó las bandas de frecuencia que presentan mayor diferencia entre ambas grabadoras y se resaltó la diferencia entre la ganancia en las grabaciones. Finalmente se hizo una clasificación de los índices con características en común y se propuso un modelo a seguir para hacer comparación de índices entre ambas grabadoras. No obstante, es importante tener en cuenta que el estudio se realizó con grabaciones realizadas con una misma caja protectora para Audiomoth y dado que no se tenía una base de datos con grabaciones continuas registradas en el mismo punto geográfico, en trabajos futuros se debe verificar si los índices siguen siendo comparables al cambiar la caja protectora. Este proyecto es de gran importancia para el monitoreo acústico ya que permitirá a los grupos de investigación utilizar ambas grabadoras o cambiar a una más económica como la Audiomoth sin tener que hacer estudios individuales supervisados y se presenta como una propuesta novedosa que permitirá acoplar la información de ambas grabadoras.

Objetivos

General

- Identificar las causas de la variación de los índices acústicos analizando las pérdidas de ganancia en las diferentes bandas de frecuencia con el fin de establecer la viabilidad de usar grabadoras Audiomoth en los análisis eco acústicos.

Específicos

- Identificar los índices acústicos que tienen mayor cambio en grabaciones simultaneas realizadas en dos puntos diferentes del bosque húmedo con grabadora de alto costo (SM4, considerada el “gold *standard*”) y de bajo costo (Audiomoth).
- Estimar los cambios en las ganancias de la señal de audio y en los índices acústicos para las diferentes frecuencias. El análisis se realizará para cada grabadora a través del análisis del espectro.
- Identificar el origen de la variación de los índices acústicos para las frecuencias donde se observe mayor cambio al analizar la ganancia vs los índices.

Marco Teórico

Índices acústicos

Los índices acústicos buscan medir la diversidad en los sonidos, entre mayor sea la diversidad de especies más irregularidad espectral y temporal describirá la zona. Bajo esta premisa se han propuesto diferentes índices, unos buscan explicar patrones de diversidad, efectos del ruido antropogénico sobre la biodiversidad, o la actividad acústica en distintos animales.^{[1][22]}

Índices acústicos analizados

Tabla 1. Índices acústicos tomado y modificado de (Duque-Montoya, 2018) ^[11]

Índice acústico	Ecuación	Explicación
Entropía temporal (TE o H _T)	$H_t = - \frac{\sum_t^{N_t} \varepsilon(t) * \log_2[\varepsilon(t)]}{\log_2 N_t}$	Este índice asume que los sonidos de los animales afectarán la envolvente de amplitud en cada unidad de tiempo. Basado en el supuesto: “cuantas más especies en una comunidad, más diferentes se producirán señales” Donde $\varepsilon(t)$ es la transformada de Hilbert evaluada en el paso temporal t y N_t es el número de pasos temporal. (Sueur et al., 2008). ^[1]
Wiener Entropy (SF)	$\frac{\sqrt[N_f]{\prod_{j=1}^{N_f} W_j}}{\bar{W}}$	Calcula la entropía de Wiener o spectral flatness. La razón de la media geométrica del espectro de potencia a su significado aritmético. Cuanto mayor sea el valor, más frecuencia complejidad. Con N_f es el número de pasos frecuencial, W_j es la estimación de densidad espectral de potencia de Welch en el bin j y \bar{W} es la media de la DEP de Welch. ^[2]
Frecuencia de modulación (FM)	$\frac{\sum_{i=1}^{N_t-1} \sum_{j=1}^{N_f-1} \frac{180^\circ}{\pi} \left \arctan \frac{I_{i,j+1} - I_{i,j}}{I_{i+1,j} - I_{i,j}} \right }{(N_f - 1)(N_t - 1)}$	Calcula la modulación frecuencial, La modulación frecuencial es el ángulo medio de las derivadas direccionales. Los valores altos indican cambios abruptos en la intensidad. Donde $I_{i,j}$ es la amplitud normalizada de cada pulso en el paso de tiempo i y bin de frecuencia j . ^[3]
Media de la amplitud envolvente (M)	$M = \text{median}(\varepsilon(t)) * 2^{\text{depth}-1}$	Este valor se estima utilizando la envolvente de la señal mediana. M da idea del tamaño de la señal. Donde $\varepsilon(t)$ es la envolvente de la señal, calculada con la transformada de Hilbert evaluada en el paso temporal t . ^[4]
Numero de picos (NP)	$\Lambda_j = \begin{cases} 1 & \text{if } S_j > S_m \cap \overline{ dS_l } > 0.01 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$	Basado en el supuesto: "Entre más picos más actividad acústica" se estima el nivel de actividad acústica. Donde m son los bin de frecuencia inferiores a j , l son los bin circundantes del pico y Λ_j son los picos mayores en el espectro medio y es 1 si j es un pico mayor o 0 en caso contrario. ^[5]

	$NP = \sum_{j=1}^{N_f} \Lambda_j$	
Mid-band activity (MID)	<p>Área bajo la curva de P(f) para el intervalo (450HZ, 3500HZ).</p> $F_f = \begin{cases} P_f & \text{si } P_f > \bar{P}_f \\ 0 & \text{si } P_f < \bar{P}_f \end{cases}$ $\int_{450 \text{ Hz}}^{3500 \text{ Hz}} F_f$	Fracción del espectrograma en la banda (450 Hz, 3500 Hz), donde la amplitud es mayor que un umbral. Donde P_f es la media del espectrograma temporal para la frecuencia f y F_f son los valores por encima del umbral \bar{P}_f . (Towsey et al., 2014). [6]
Índice de complejidad de complejidad acústica tiempo-frecuencia (ACIf)	$d_{f,k} = (s(n, f) - s(n + 1, f)) $ $ACI_{f,k} = \frac{d_{f,k}}{\sum_n s(n, f)}$ $ACI_j = \sum_{bins}^k ACI_{f,k}$ $ACI = \sum_f ACI_f$ $\sum_{k=1}^c \frac{\sum_{i=1}^{N_k} I_{i,j} - I_{i+1,j} }{\sum_{i=1}^{N_k} I_{i,j}}$	Calcula el ACI, Mide las variaciones de intensidad que se producen a lo largo de una grabación, en las distintas bandas de frecuencia además da mayor valor a las señales con mayor amplitud. C es el número de agrupaciones temporales en la grabación (generalmente, c=5 para grabaciones de un minuto), k es un grupo temporal específico para el cálculo y $s(n, f)$ son los valores del espectrograma. [7]
Índice de complejidad acústica Frecuencia-Tiempo (ACIfT)	$\sum_{i=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_f-1} \frac{ I_{i,j} - I_{i,j+1} }{(I_{i,j} + I_{i,j+1})}$	Calcula el índice de complejidad acústica, que mide la información en dos bins de frecuencia sucesivos, se calcula primero sobre la frecuencia y luego sobre el tiempo $I_{(i,j)}$ es la amplitud normalizada de cada pulso en el intervalo de tiempo i y de frecuencia j [8]
Factor de cresta (CF)	$\frac{E_{peak}}{RMS}$	Calcula el factor de cresta, es el cociente entre el valor pico de la señal de energía y su valor cuadrático medio (RMS). Los valores altos indican muchos picos en la señal de energía. E_{peak} son los valores picos de energía. [9]
Índice de diversidad acústica (ADI)	$ADI = - \sum_i p_i * \log_2 p_i$	Estima la diversidad de sonidos con la entropía de Shannon en franjas de frecuencia (bins) ADI se calcula con la ocupación de cada banda de frecuencia. La ocupación p_i es la fracción del sonido en la banda i. [10]
Índice de diversidad acústica modificado (ADIm)	$ADIm_i = - \sum_i^{i+1} p_i * \log_2 p_i$ <p>$i = 0 \text{ Hz}, 1 \text{ kHz}, 2 \text{ kHz}, \dots, 11 \text{ kHz}$</p>	Calcula el vector de ADI modificado propuesto en [5], se calcula ADI por bins de frecuencia de 1 kHz y el ruido de fondo de frecuencia utilizado es el del índice BNF reemplazando los -50 dB propuestos por el autor en ADI [11]
Entropía máxima espectral (ESM)	$U(f) = \max_{\forall f} [s(n, f)]$ $ESM = - \sum_f U(f) * \log_2 U(f)$	Calcula el índice de Shannon indicando la riqueza de especies. (Towsey et al., 2014). se aplica a los valores máximos de

		<p>cada intervalo de frecuencia en el espectrograma, pero solo en la banda entre 482 Hz y 8820 Hz (expandingo la banda de biofonía). Donde $U(f)$ es el valor máximo en la banda de frecuencia f [12]</p>
Entropía de varianza espectral (ESV)	$V(f) = \text{var}_{\nu f=\nu} [s(n, f)]$ $ESV = - \sum_f V(f) * \log_2 V(f)$	<p>El índice de Shannon se calcula de la misma manera que ESM pero en este caso se aplica a el valor de la varianza para cada bin de frecuencia. Donde $V(f)$ representa el valor de varianza en el bin frecuencia. [12]</p>
Índice de la diferencia normalizada de paisajes sonoros. (NDSI)	$NDSI = \frac{\beta_N - \alpha_N}{\beta_N + \alpha_N}$	<p>Estima el nivel de ruido antropogénico sobre el paisaje sonoro. Donde β_N es el valor en la banda de biofonía (2 kHz a 8 kHz) y α_N es el valor en la banda de antropofonía (200 Hz a 1,5 kHz). [13]</p>
Índice bioacustico (Beta)	$\int_{2 \text{ kHz}}^{8 \text{ kHz}} \beta_B$	<p>Mide la relación entre el ruido de fondo y las vocalizaciones de aves, basado en las observaciones de Boelman et al. (2007). Donde β_B es la media del espectrograma a lo largo de la dimensión de tiempo [14]</p>
Relación de biofonía a antropofonía (ρ)	$\rho = \frac{\beta_\rho}{\alpha_\rho}$	<p>Basado en los estudios de paisajes acústicos realizados por Krause (Qi et al., 2007). Se llego a la conclusión de que las señales biofónicas estaban en el rango de 2000 Hz a 8000 Hz, (β_ρ) la cual es la suma del paisaje sonoro, potencia basada en intervalos de frecuencia de 1 kHz en este rango. El término antropofonía es típicamente en el rango de 0.2 kHz a 1.5 kHz (α_ρ), que es la suma de la potencia del paisaje sonoro basada en intervalos de frecuencia de 1 kHz en este rango. [15]</p>
Spectral Bandwidth (SB)	$Sb^2 = \sum_{k \in K_+} (k - Sc)^2 \tilde{X}(k)$	<p>Describe la desviación media de la masa del espectro alrededor de su centroide, asociado con el ancho de banda de la señal. Las señales similares al ruido suelen tener un valor alto de ancho de banda espectral, mientras que los sonidos tonales individuales con picos aislados resultarán en valores bajos. Donde Sc es el centroide espectral, k es un índice de frecuencia, K_+ contiene solo los índices no negativos y \tilde{X} es el espectro de magnitud normalizado. [16]</p>
Tonnetz	$\zeta_n(d) = \frac{1}{\ \mathbf{c}_n\ _1} \sum_{l=0}^{11} \Phi(d, l) \mathbf{c}_n(l) \quad \begin{matrix} 0 \leq d \leq 5 \\ 0 \leq l \leq 11 \end{matrix}$	<p>Calcula las características del centroide tonal. ζ_n es el vector del centroide tonal en 6 dimensiones, l es el índice de clase de tono vectorial, d indica en cual dimensión se está calculando, Φ matriz de transformación y \mathbf{c} vector cromo [17]</p>

Spectral Centroid	$Sc = \sum_{k \in K_+} k \tilde{X}(k)$	El centroide espectral es una medida utilizada en el procesamiento de señales digitales para caracterizar un espectro. Indica dónde se encuentra el centro de masa del espectro. [16]
Grado de musicalidad (MD)	$\frac{\sum_j^{N_f-1} \log(W_{j+1}^2 - W_j^2)}{\log(f_{j+1} - f_j)} \cdot \frac{1}{N_f - 1}$	Calcula la pendiente media de la curva 1/f. MD es una medida de la complejidad temporal de la señal. Donde W es la estimación de densidad espectral de potencia de Welch. [18]
Raíz de la media cuadrática (RMS)	$\sqrt{x(t)^2}$	Calcula el valor RMS de la señal (x(t)). Que es el valor cuadrático medio. Es una medida de amplitud de la señal. [19]
Ruido de fondo en frecuencia (BNF)	$\overline{\text{mode}(s_{i,w})}_{w=j}$	Calcula el valor del ruido de fondo para cada celda del espectrograma en el eje de las frecuencias j. [20]
Ruido de fondo en el tiempo (BNT)	$\text{mode}(spl)$	Ruido de fondo temporal en dB. Basado en el valor de modo de la señal de nivel de presión acústica inmediata (SPL). [20]
Relación señal a ruido (SNR)	$\frac{\text{potencia señal}}{\text{potencia ruido}}$	La diferencia entre el valor máximo en dB y el valor en dB de BGN, entre mayor sea el valor la señal tiene menos ruido [21]

*Los índices M y TE no se analizaron debido a que al estimarlos con el aplicativo de Python presentaron valores no coherentes para los audios analizados (TE valor 0 y M sin valor).

Audiomoth

La Audiomoth es una grabadora desarrollada por investigadores de la universidad de Southampton, es un registrador acústico full espectro de bajo costo, es mono canal de 12-bit (con sobre muestreo llega a 16 bit) y captura sonidos en frecuencias tanto audibles como ultrasónicas en formato WAV a velocidades de 8.000 a 384.000 muestras por segundo. Tiene un micrófono MEMS (Micro Electrical-Mechanical System) tipo analógico que graba a frecuencias de muestreo de hasta 192 kHz. Se alimenta con 3 pilas AA. [23][24]

SM4

Es una grabadora de alto costo, Considerada *gold standard* o de máxima calidad, diseñada para grabar sonidos audibles de animales en la intemperie en dos canales de 16-bit en formato WAV. Tiene 2 micrófonos incluidos con un rango de frecuencia de muestreo de 20KHz a 48KHz, son omnidireccionales y tienen una sensibilidad de -28 dB +/- 3 dB a 1 kHz. Se alimenta con 4 baterías tipo D, que dan hasta 30 días de autonomía; se puede programar dependiendo el tipo de grabación que se quiera hacer, es decir, en intervalos o continua y los archivos se guardan en memorias tipo SDHC o SDXC clase 4 o superior. [25]

Metodología

Base de datos

Para el análisis, se utilizó una base de datos proporcionada por el grupo Herpetológico de Antioquia GHA de la Universidad de Antioquia que contiene 3.532 audios grabados en dos puntos geográficos y fechas diferentes en bosques húmedos de Anorí y Amalfi, Antioquia, cada grabación dura 1 minuto y se tomaron cada 16 min durante 11 días, estas grabaciones están distribuidas como se muestra en la tabla 3.

Tabla 2. Parámetros de grabación de cada grabadora.

Tipo grabadora	Audiomoth	SM4
Método grabación	Mono	Estéreo
Frecuencia de muestreo	48 kHz	44.1 kHz
Duración grabación	1 min	1 min
Ganancia grabación	Media	16 dB (preamp. 24 dB)

Tabla 3. Distribución lugares de grabación.

		Sitio 1 (G21)	Sitio 2 (G60)
Inicio	Fecha	20/05/2019	3/06/2019
	Hora	19:00 h	11:16 h
Fin	Fecha	30/05/2019	13/06/2019
	Hora	10:12 h	10:28 h
Total de audios para cada grabadora		868	898

Metodología usada

A continuación, se presenta la metodología que se planteó para procesar los audios, estimar índices e identificar el motivo por el cual se presentaba la diferencia entre ambas grabadoras.



Figura 1. Etapas del proyecto para identificar variaciones en los índices acústicos entre SM4 y Audiomoth.

- **Estimación de los índices**

Para realizar esta etapa, se adaptó un aplicativo desarrollado en Python que permitió estimar el valor de los índices con los audios en todas las frecuencias y filtrados en pasa banda, pasa baja y pasa alta. La estimación se hizo separando los audios por lugar y grabadora. Posteriormente se generaron dos archivos de Excel en los cuales se unificaron los valores de ambas grabadoras, cada uno para un lugar, estos resultados se graficaron. Los índices se organizaron de forma que se pudieran observar primero los que presentaban mayor diferencia entre ambas grabadoras y finalmente los que se asemejaban o presentaban diferencias pequeñas.

En la Figura 2 se muestra la interfaz del aplicativo utilizado en Python, en el cual se selecciona la carpeta donde están las grabaciones, el tipo de filtro requerido para los audios, seleccionar si se calculan índices o PSD y que índices se quieren calcular. En aplicativo RMS y ADIm1-11 se calculan por defecto.

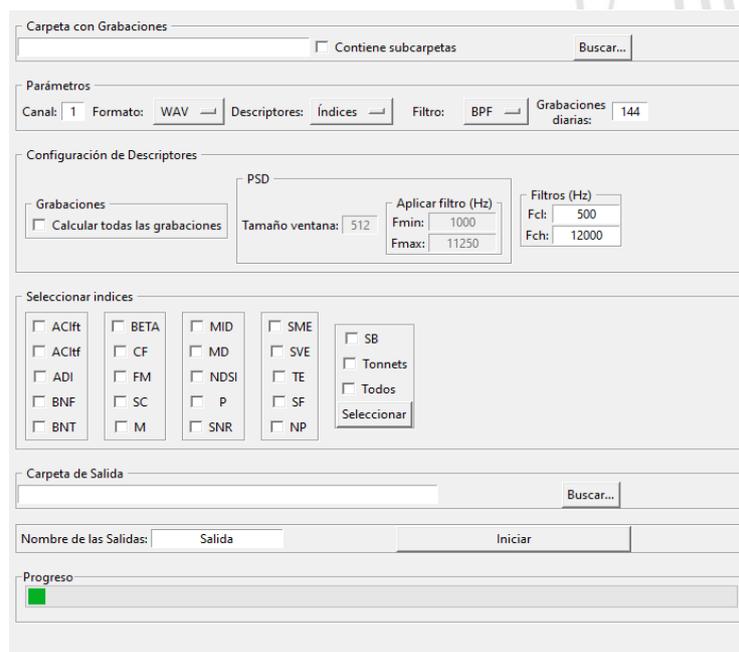


Figura 2. Interfaz aplicativo Python para calcular valor de los índices

- **Análisis Espectral**

Teniendo en cuenta los resultados hallados en un estudio anterior [26], donde se evidenció que ambas grabadoras tienen una ganancia diferente, se hizo un análisis de ganancia para la base de datos de este proyecto. En la Figura 4 se observa que la SM4 presenta una pérdida de ganancia en frecuencias altas, se calculó y graficó la Densidad espectral de Potencia individual, promediada por días y promediada por lugares, esto con el fin de observar las ganancias por banda de frecuencia comparando el valor entre ambas grabadoras, además se hicieron los espectrogramas promedio por día y por lugar para cada grabadora (Figura 5 y Figura 6), allí se observó la diferencia de ganancia y la divergencia que presentaban ambas grabadoras debido a la pérdida de ganancia de la SM4 en frecuencias altas.

- **Análisis externo Audiomoth y SM4**

La caja protectora utilizada en la Audiomoth en los audios de la base de datos de esta investigación partió de la decisión tomada en [26] donde realizaron un estudio usando diferentes protecciones para la Audiomoth. Se analizaron algunos audios de los analizados en Lopez et al. 2020[26] y grabados por el grupo Herpetológico de Antioquia GHA de la Universidad de Antioquia para evidenciar si la caja seleccionada afectaba la toma de los audios o no, para esto se realizaron los espectrogramas de la Audiomoth con caja, sin caja y de la SM4 (Figura 7).

- **Clasificación de los índices**

Se ordenaron los índices por características similares, tomadas a partir de: la fórmula para calcularse, comportamiento en la comparación entre las dos grabadoras, frecuencias en las que se estiman y afectación de la diferencia de muestreo de los audios. Con esto se buscó brindar alternativas para comparar los índices basándose en las características y no en los índices individuales.

- **Índices con preprocesamiento de los audios**

Se hicieron nuevas estimaciones de los índices, filtrando el audio en frecuencia pasa banda (500 Hz a 11 kHz y 3 kHz y 11 kHz), pasa baja (11 kHz), pasa alta (500 Hz) y un cálculo aparte en el cual se normalizaron los audios. Se seleccionó el filtrado desde los 500 Hz para evitar el auto ruido que generan los micrófonos en bandas de frecuencia baja (0 a 500 Hz) [27]. Adicionalmente se normalizó los índices a posteriori para audios con todas las frecuencias y filtrados en los rangos de frecuencias de pasa banda descritos anteriormente.

Resultados y análisis

Se estimaron los índices de ambas grabadoras y lugares y se hizo la comparación por lugar, inicialmente se hizo la comparación calculando los índices con todas las frecuencias de los índices. Se observa que solo los índices (BNT, ACITf, ADIm4-11) presentaron similitud para ambas grabadoras mientras que todos los demás índices tuvieron diferencias significativas en su comportamiento. Para determinar cuáles presentaban mayor diferencia se promediaron los valores y se utilizó la fórmula 1 para representar la diferencia de los índices para cada grabadora de forma porcentual. Se graficaron los resultados en la Figura 3. En ésta se observa que índices como RMS, SF, P, NDSI y SC presentaron la mayor diferencia. Después de ver la obvia diferencia entre los índices con el gráfico comparativo y el porcentual se calculó

y graficó la densidad espectral de potencia para poder ver la ganancia de cada grabadora a lo largo del eje de las frecuencias (Figura 4).

$$\% = \frac{\text{Promedio índice Grabadora } n}{\text{Promedio índice grabadora 1} + \text{Promedio índice grabadora 2}} \quad (1)$$

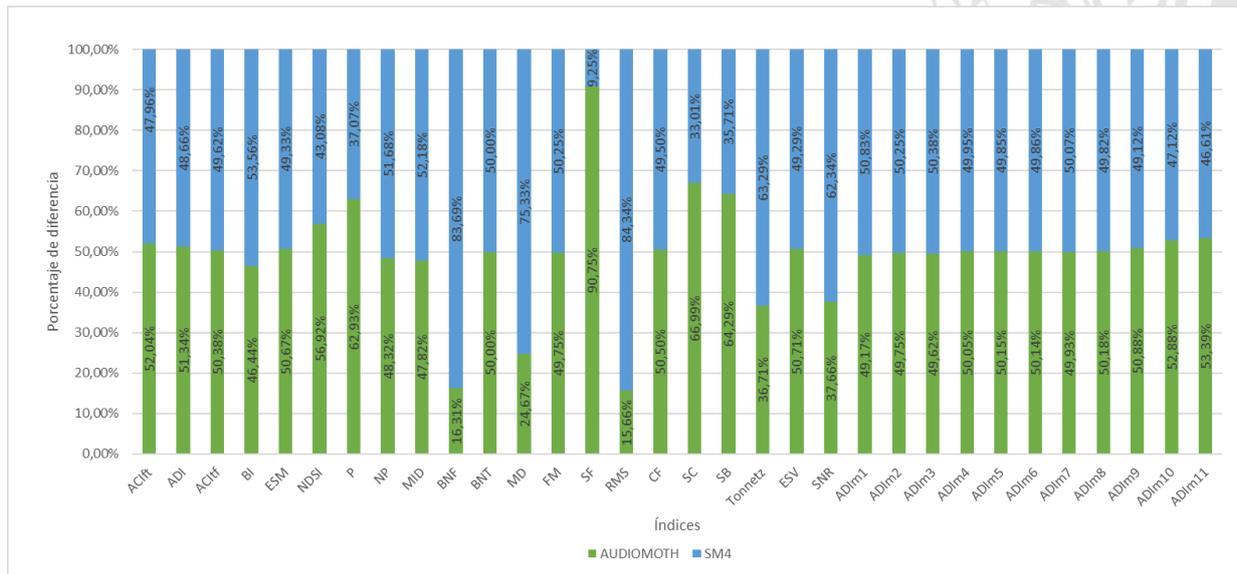


Figura 3. Diferencia porcentual del comportamiento de los índices entre Audiomoth y SM4

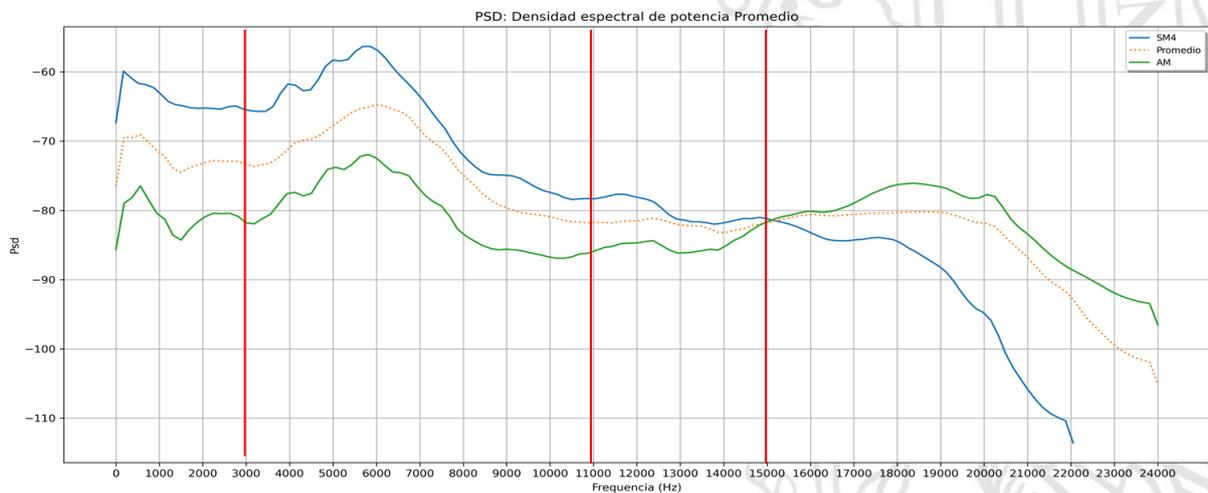


Figura 4. Densidad espectral de potencia promediada en el lugar G21

Al graficar la densidad espectral de potencia, Figura 4, se pudo observar que la grabadora SM4 (línea azul) presenta una ganancia superior a la Audiomoth (línea verde) desde los 0 Hz pero a partir de los 11 kHz ésta ganancia empieza a descender y desde los 11 kHz hasta los 15 kHz tienen un valor similar hasta llegar al punto de cruce, por otro lado la Audiomoth mantiene un umbral en la ganancia y logra grabar hasta llegados los 24 kHz, dado que la diferencia en la ganancia es significativa. Este

comportamiento de ganancia fue el mismo que se encontró en [26]. Con el fin de corroborar la diferencia de ganancia en las diferentes frecuencias, se realizó el espectrograma promedio a lo largo de los 11 días de grabación para cada registradora, al observar el resultado en la SM4 (ver Figura 5). Con esta gráfica se comprueba que a partir de los 11 kHz el audio tiene menos energía y a partir de los 15 kHz la SMA4 no grabó información. Por otro lado, cuando se analiza el espectrograma de la Audiomoth (Figura 6) se evidencia que hay menor energía en las frecuencias bajas (0 Hz hasta los 2 kHz), sin embargo, el comportamiento de ambas grabadoras es igual desde los 2 kHz hasta los 11 kHz. Audiomoth grabó frecuencias hasta los 24 kHz dado que su frecuencia de muestreo elegida para grabar fue de 48Khz. No se analizaron frecuencias mayores de muestreo porque la SM4 no permite grabar a mayor frecuencia. Por otra parte, los fabricantes de la Audiomoth aseguran que permite grabar a una tasa de muestreo de hasta 384 kHz permitiendo, teóricamente, registrar sonidos con frecuencias de hasta 190 kHz Teniendo presente la diferencia de ganancia y la información en frecuencias altas de la Audiomoth, se decidió realizar una comparación de los índices filtrando las señales en el mismo rango de frecuencias (hasta los 11 kHz).

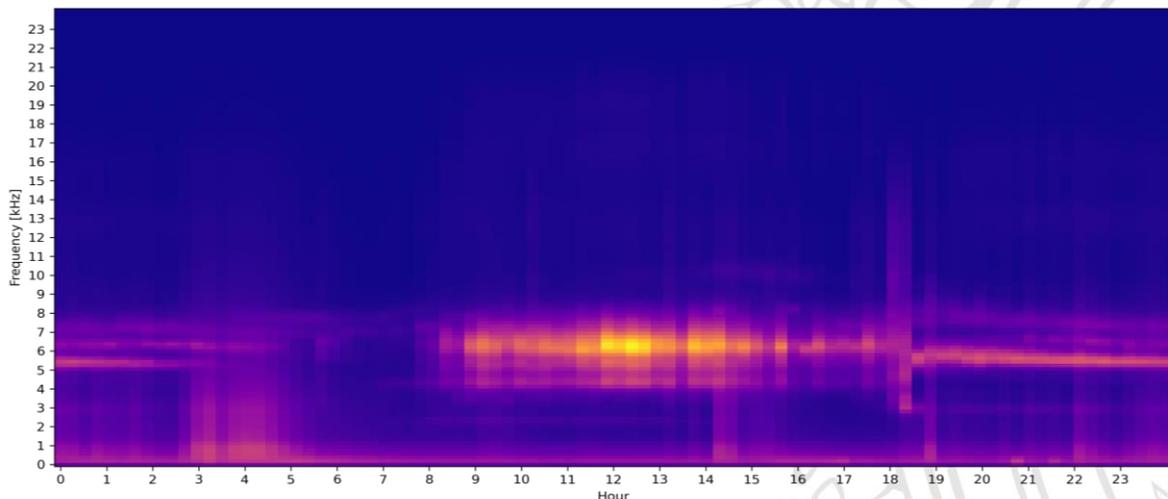


Figura 5. Espectrograma promedio de la grabadora SM4 en la zona G21

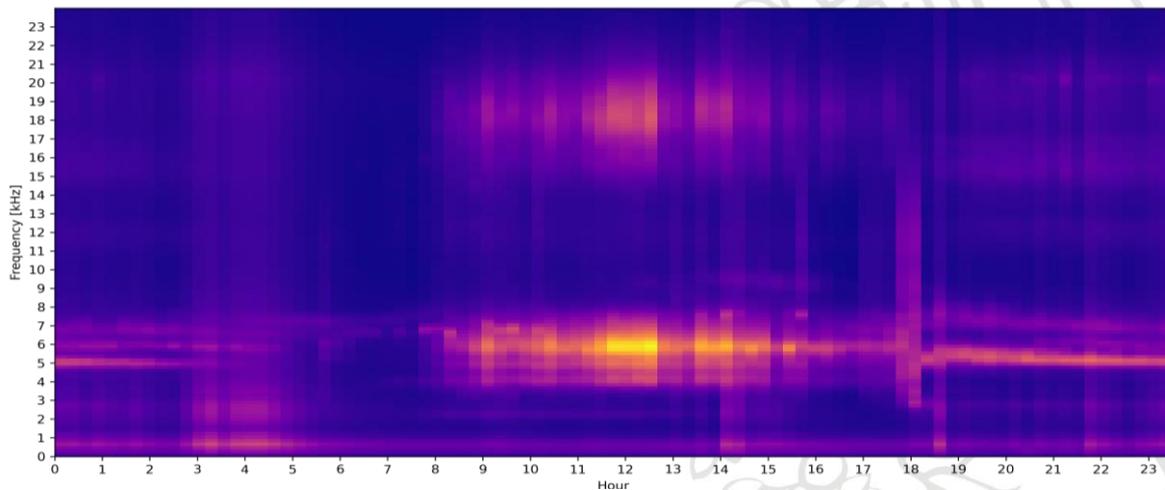


Figura 6. Espectrograma promedio de la grabadora Audiomoth en la zona G21

En Lopez et al. 2020 [26] se discute acerca de la diferencia y la pérdida de ganancia que tiene la SM4, adicionalmente se hicieron pruebas con Audiomoth usando diferentes protecciones y de la SM4 en un ambiente controlado en una zona de bosque húmedo cercana a Buenaventura. Con el fin de comparar la intensidad del audio entre la SM4 respecto a la Audiomoth sin protección y con la caja protectora con la que se protegió la Audiomoth en las grabaciones usadas en este proyecto, se hizo el espectrograma de estos audios, Figura 7.

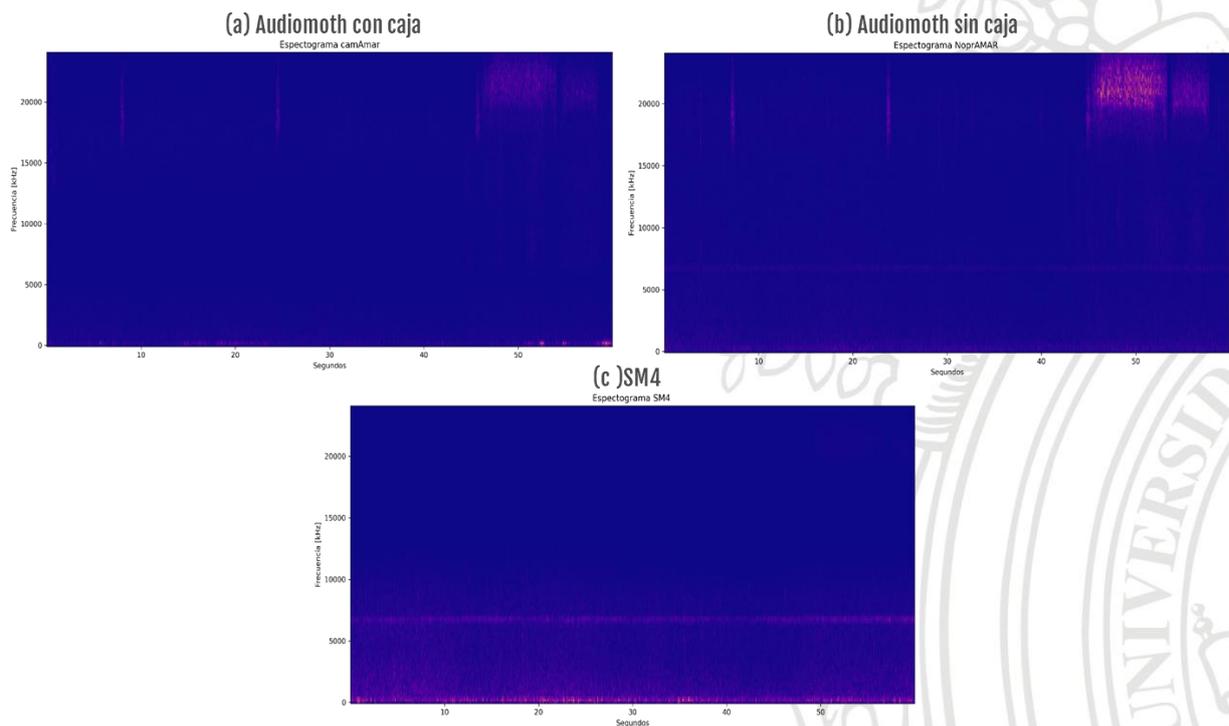


Figura 7. Espectrograma comparativo de la Audiomoth con caja, sin caja y SM4

En la Figura 7, se observó nuevamente que la SM4 presenta mayor ganancia en frecuencias bajas, pero en las altas la ganancia disminuye. La Audiomoth sin caja por su parte tiene menor intensidad en todo el audio respecto a la SM4, sin embargo, grabó los sonidos más relevantes y registro en frecuencias altas. Al observar la Audiomoth con caja se concluyó que la caja disminuye la ganancia de entrada y funciona como un atenuador de la señal, a pesar de esto, la Audiomoth con caja permite registrar los sonidos más relevantes en biofonía (banda de 1.5 kHz a 8 kHz) y antropofonía (banda de 0.2 kHz a 1.5 kHz).

Para realizar el análisis de la influencia de las frecuencias se estimaron los índices con los audios filtrados en tres tipos de filtro diferente:

- 1) Filtro pasa baja de 11 kHz
- 2) Filtro pasa alta de 500 Hz
- 3) Filtro pasa banda de 500 Hz a 11 kHz

Con este análisis se pudo evidenciar que la grabadora SM4 presenta ganancia alta en la banda de frecuencia menor a 500 Hz. Dado que esta información no está en la banda de biofonía es irrelevante

para muchos estudios de monitoreo acústico y es considerada ruido. Por otro lado, la ganancia de la Audiomoth en frecuencias altas también afectó el comportamiento de la señal, esto hizo que se aumentara significativamente los valores y picos en la señal a lo largo del tiempo y por ende el resultado de la estimación de los índices fue diferente a la SM4. Con el filtrado en pasa banda (500 Hz a 11 kHz) se observó que los índices RMS y BNF tenían el mismo comportamiento (Figura 8a y 8c, respectivamente), pero el umbral era diferente. Se normalizaron los audios (dejando como valor máximo 1 y -1 para Audiomoth y -0,95 para SM4) antes de calcular los índices, pero no se observó una mejoría entonces se realizó una normalización de los índices. El resultado se presenta en la figura 8b para RMS y 8d para BNF, allí se muestra que ambos índices son comparables entre ambas grabadoras (Audiomoth en verde, SM4 en azul) si se realiza un filtrado pasa banda y la normalización de los índices. El gráfico de barras es la diferencia porcentual del comportamiento del índice, descrito en la fórmula 1.

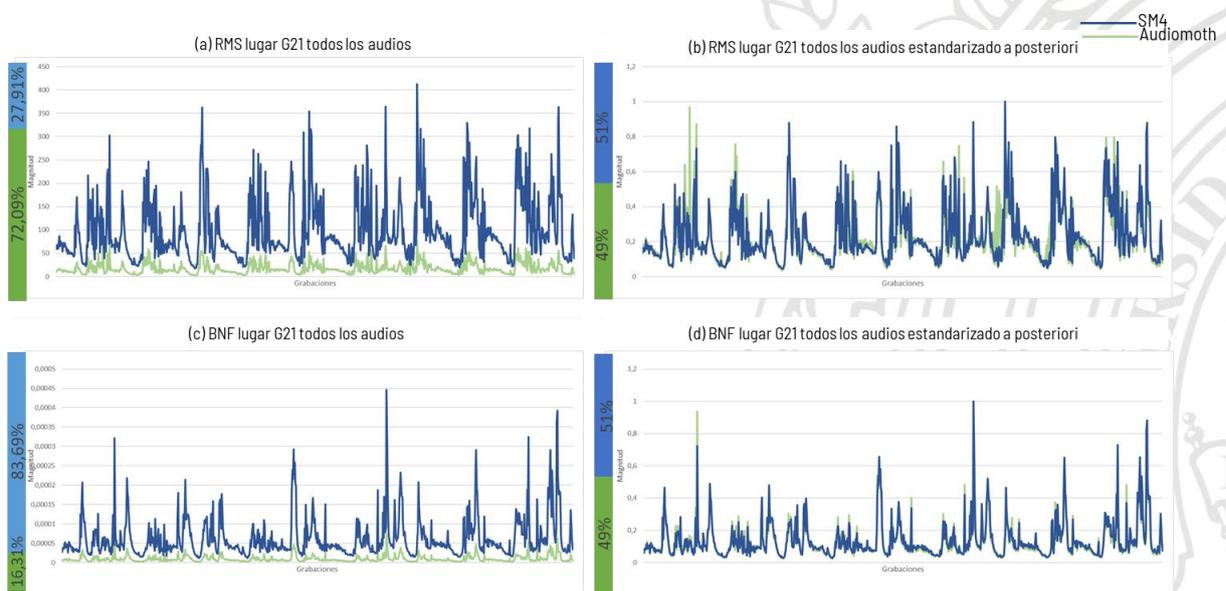


Figura 8. Gráfica comparativa índices filtrados (500hz a 11Khz) con y sin normalización de los índices (a) RMS todos los audios; (b) RMS todos los audios con normalizada; (c) RMS todos los audios; (d) RMS todos los audios con normalizada

A pesar de tener las grabaciones en el mismo rango de frecuencias los demás índices no presentaron semejanza entre sí, por esto era importante saber en qué rango de frecuencias había mayor diferencia. En el caso del índice ADIm se analizaron las bandas de frecuencia desde 0 hasta 11 kHz. Esto se puede hacer porque ADIm entrega información por cada bin de frecuencia, de tal manera que se conoce el comportamiento banda por banda. De esta manera se evidenció que en los ADIm1-3, es decir, en el rango de 0 Hz a 3 kHz había una diferencia significativa, y la SM4 presentó valores más altos, en la Figura 9 se puede observar la comparación. A partir de ADIm4 (3 kHz a 4 kHz) y hasta ADIm11 el comportamiento fue prácticamente el mismo para los audios de las dos grabadoras.

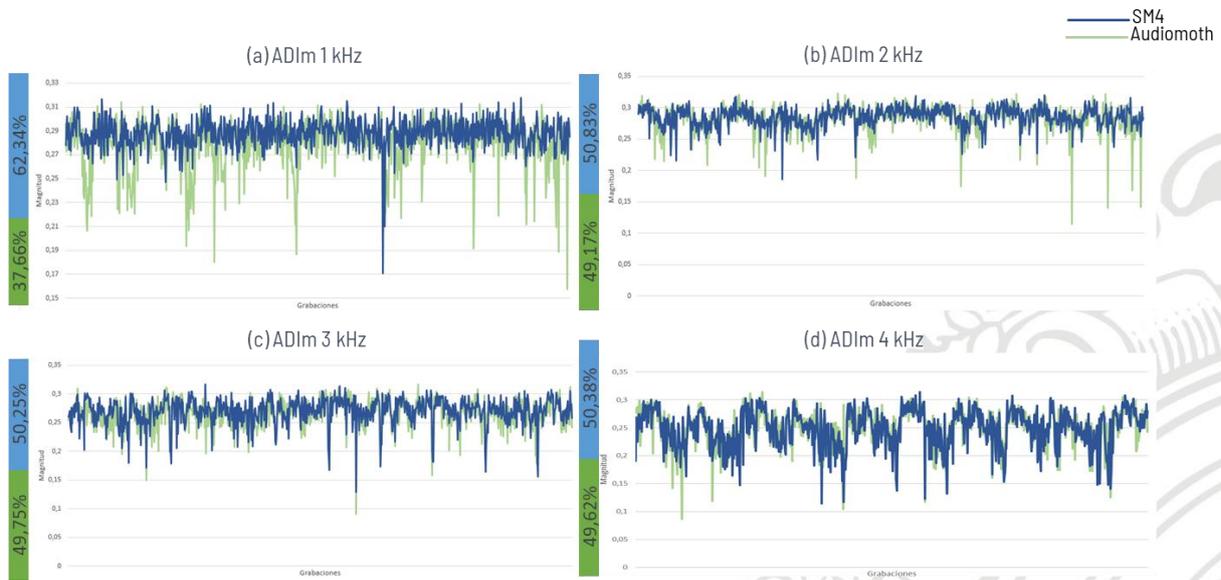


Figura 9. Gráfica de ADIm1 a 4. a) ADIm1 (0 Hz a 1 kHz); b) ADIm2 (1 kHz a 2 kHz); c) ADIm3 (2 kHz a 3 kHz); d) ADIm4 (3 kHz a 4 kHz)

Se realizó un nuevo filtrado en frecuencia de los audios entre 3 kHz y 11 kHz, esto con el fin de poder observar si los demás índices estaban siendo afectados por las frecuencias bajas (0 Hz a 3 kHz), de este análisis se exceptuaron los índices NDSI, BETA, RHO, ESV, ESM y ADIm₁₋₁₁ porque los dos primeros relacionan las frecuencias de biofonía (2 kHz a 8 kHz) y antropofonía (0,2 kHz a 1,5 kHz), RHO se calcula en la frecuencia de biofonía; ESM y ESV extiende el rango de biofonía y se calculan entre (482 Hz y 8820 HZ) y ADIm₁₋₁₁ por ser calculados por bin de frecuencia fija de 1 kHz. Se excluyen del filtrado para no alterar el índice y obtener información errada o incompleta al eliminar un gran porcentaje de frecuencia de la señal.

Con las señales filtradas entre 3 kHz y 11 kHz, para los índices ADI, CF, SNR, SC, SB, MID y Tonnetz se observa que los índices para las dos grabadoras son similares. A pesar de esto, en los demás índices (NDSI, BETA, RHO, ESV, ESM, ACIf_t, SC, FM, NP, M, TE, MD y SF) no se evidenció una mejoría en la similitud.

Posteriormente se realizó las gráficas de la señal de audio promedio en el tiempo por día (ver figura 10) y se encontró que hay una gran cantidad de ruido capturado, como se observa en la Figura 10 donde el día 1 (20-05-2019) (ver figura 10a) en la Audiomoth se muestran los picos de sonidos relevantes, mientras que en la SM4 no se diferencia los picos del ruido y el día 10 (29-05-2019) (ver figura 10b) hay gran cantidad de ruido capturado por las 2 grabadoras y no se pueden observar los datos relevantes como serían los picos por sonido de biofonía. Con base a la gráfica del día 1 (Figura 10a), que fue un día sin lluvia, se decidió realizar un estudio para determinar si los otros 10 días de grabación fueron de lluvia y eso estaba afectando la estimación de los índices.

Como ambas grabadoras se afectaron por la lluvia, entonces se realiza una nueva estimación de los índices, pero calculando por separado los audios que se detectaran con lluvia de los audios que no tienen lluvia. El aplicativo de Python separa automáticamente los días que considera de lluvia y no, para esta separación se estima el promedio del valor PSD de los audios de cada grabadora en cada sitio y los

audios con menor valor PSD al del umbral se considera que son audios sin lluvia. La propuesta de análisis de lluvia a partir del PSD de una señal se presenta en (Bedoya et al., 2017)^[28]. Adicionalmente, para corroborar los resultados del aplicativo, se identificó de forma manual los audios (escuchándolos) que tuvieran lluvia. La separación de los audios se condensa en la tabla 4. Allí se muestra que durante los días de grabación hubo mucha lluvia.

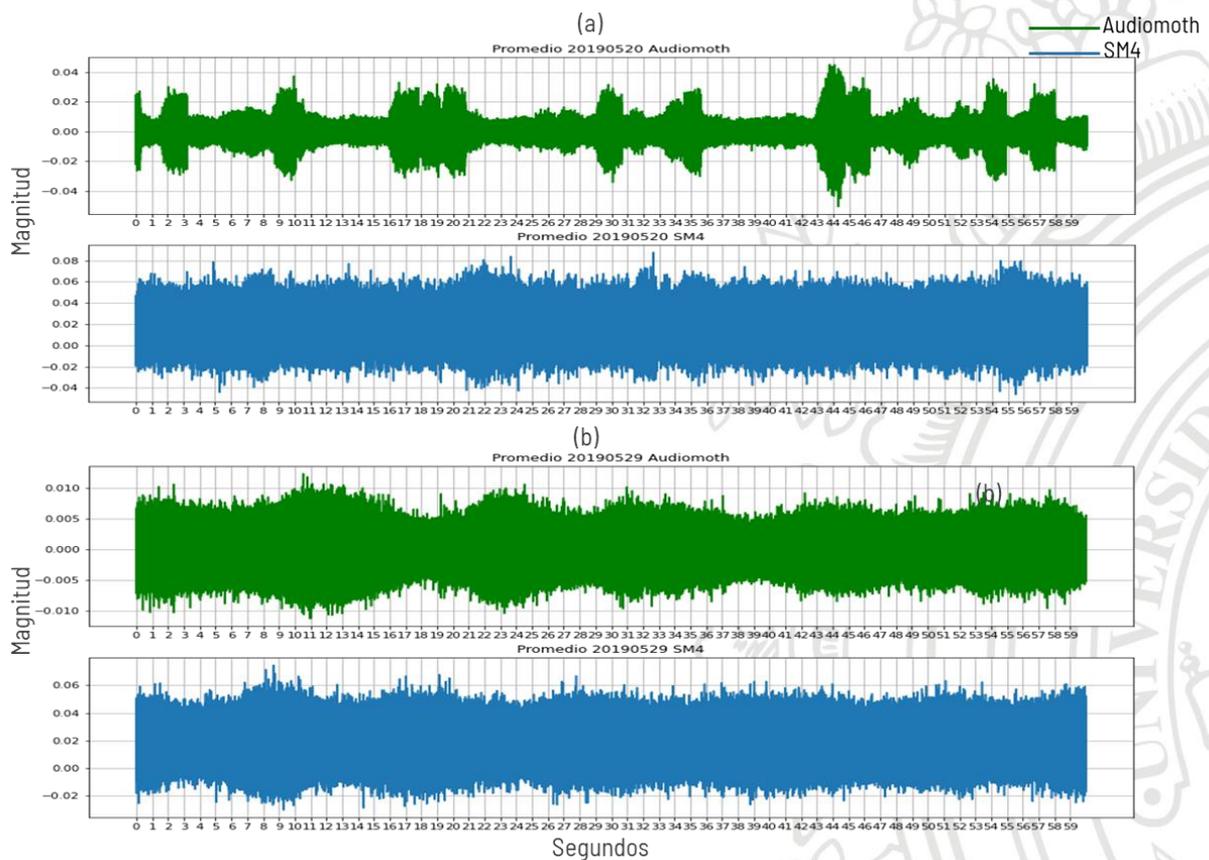


Figura 10. Gráfica comparativa audio en el tiempo promediada. a) Grabaciones del día 2019/05/20; b) Grabaciones del día 2019/05/29

Tabla 4. Resultado detección audios con lluvia lugar G21.

Zona G21 - Anorí						
	Con lluvia		Sin lluvia		Total	
	Audiomoth	SM4	Audiomoth	SM4	Audiomoth	SM4
Aplicativo	146	154	722	714	868	868
Manual	316	316	552	552	868	868

Tabla 5. Resultado detección audios con lluvia lugar G60.

Zona G60 - Amalfi						
	Con lluvia		Sin lluvia		Total	
	Audiomoth	SM4	Audiomoth	SM4	Audiomoth	SM4
Aplicativo	119	108	779	790	898	898
Manual	215	215	683	683	898	898

El aplicativo de Python, adaptado para la estimación de los índices, funciona correctamente para detectar los audios con lluvia, puede mejorarse la precisión dado que hay audios con lluvia intensa y prolongada por esto el aplicativo calcula un umbral muy alto y por ende los audios con lluvia ligera o suave no los consideró audios con lluvia. En la figura 11 se puede observar la diferencia en el promedio de las grabaciones del día 2019/05/29, en el tiempo, cuando se separan las grabaciones con lluvia (Figura 11a) de las grabaciones sin lluvia (Figura 11b).

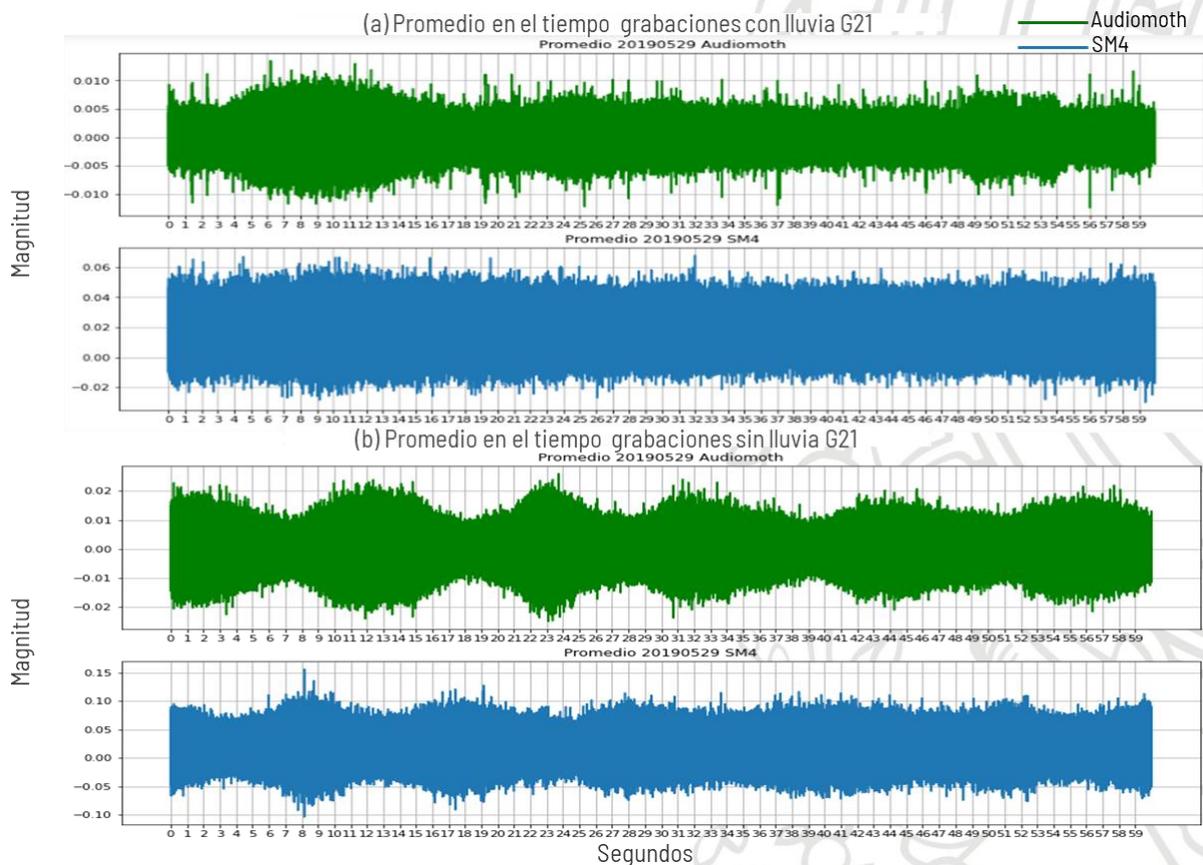


Figura 11. Gráfica comparativa audio en el tiempo promediada día 2019/05/29. a) Grabaciones con lluvia; b) Grabaciones sin lluvia

Se analizó los índices de audios con lluvia y sin lluvia por separado y se encontró que algunos índices son comparables cuando los audios no tienen lluvia. Este es el caso de índices de frecuencia fija como: NDSI, RHO, BETA, ESV, ESM y ADIm₁₋₃ (en el anexo se presentan las gráficas de estos índices con lluvia y sin lluvia). Se encontró que los audios con lluvia son los que generaron la diferencia inicial, dado que la SM4 al tener una ganancia tan alta en frecuencias bajas presenta mayores picos de amplitud. En la Figura 12 se puede ver la comparación de los índices NDSI y ESV con análisis con lluvia y sin lluvia.

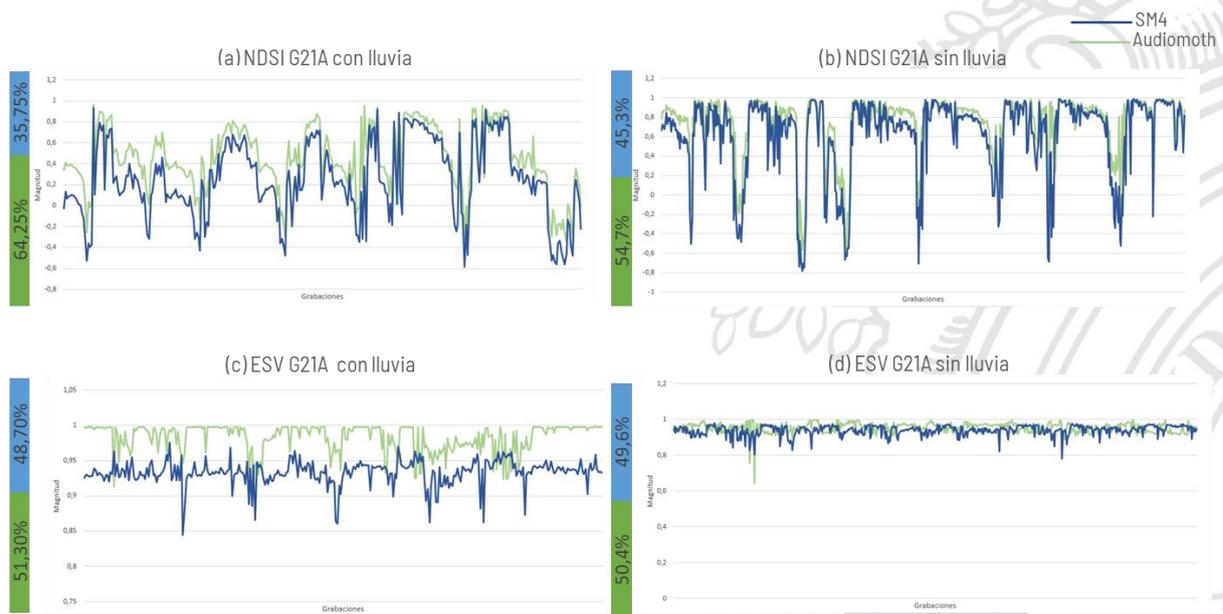


Figura 12. Índices todos los audios con lluvia y sin lluvia. a) NDSI con lluvia; b) NDSI sin lluvia; c) ESV con lluvia; d) ESV sin lluvia

Para que los índices ADI, CF, SNR, SC, SB, MID, NP y Tonnetz tuvieran comportamiento similar para ambas grabadoras, en audios sin lluvia solo requirió un filtrado de 500 Hz a 11 kHz (ver las figuras comparativas en el anexo). La limitación a 11Khz viene dada porque a partir de este valor la ganancia de la SM4 cae drásticamente con relación a la de la Audiomoth. Sin embargo, para los índices que requieren filtrarse en los audios con lluvia se deben estimar los índices en el rango de frecuencia de 3 kHz a 11 kHz, exceptuando NP que por su cálculo es muy sensible a la diferencia de ganancia en cada bin de frecuencia. En la figura 13 se hace la comparación de ADI para las dos grabadoras cuando se separan los audios con lluvia de los que no tienen lluvia. Es evidente que hay gran diferencia entre las dos grabadoras cuando los audios corresponden a días con lluvia y la diferencia de ganancias a partir de 11 kHz.

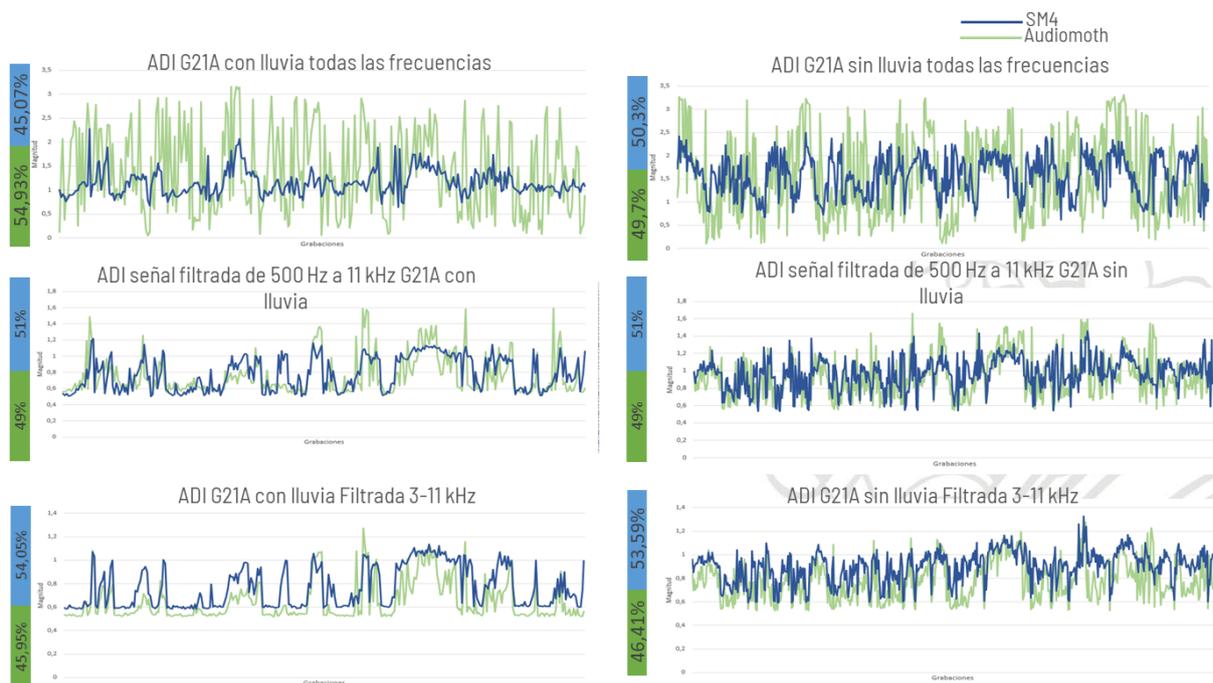


Figura 13. Gráfica comparativa de ADI con lluvia y sin lluvia, en todas las frecuencias y filtrando de 500 Hz a 11 kHz y 3 kHz a 11 kHz

A partir del análisis se hizo un agrupamiento de los índices de acuerdo con sus características. Se clasificaron en Índices de Frecuencia fija, comparables en todas las frecuencias, que requieren filtrado y que requieren filtrado y normalización de los índices. La clasificación se presenta a continuación:

- **Índices Frecuencia fija:** NDSI, RHO, BETA, ESM, ESV Y ADIm1-3
- **Índices comparables audios todas las frecuencias:** BNT, ACIf y ADIm4-11
- **Índices requieren filtrarse:** ADI, CF, SNR, SC, SB, Tonnetz, MID y NP
- **Índices filtrados y normalización a posteriori:** RMS Y BNF
- **Índices no comparables:** ACIf, SF, FM y MD
- **Índices que no se pudieron analizar:** TE y M

Con el fin de orientar a los investigadores que se dedican al monitoreo acústico de los ecosistemas, se realizó un diagrama de flujo que sirve como guía para comparar los índices entre ambas grabadoras. En la figura 14 se presenta el diagrama que sirve como guía.

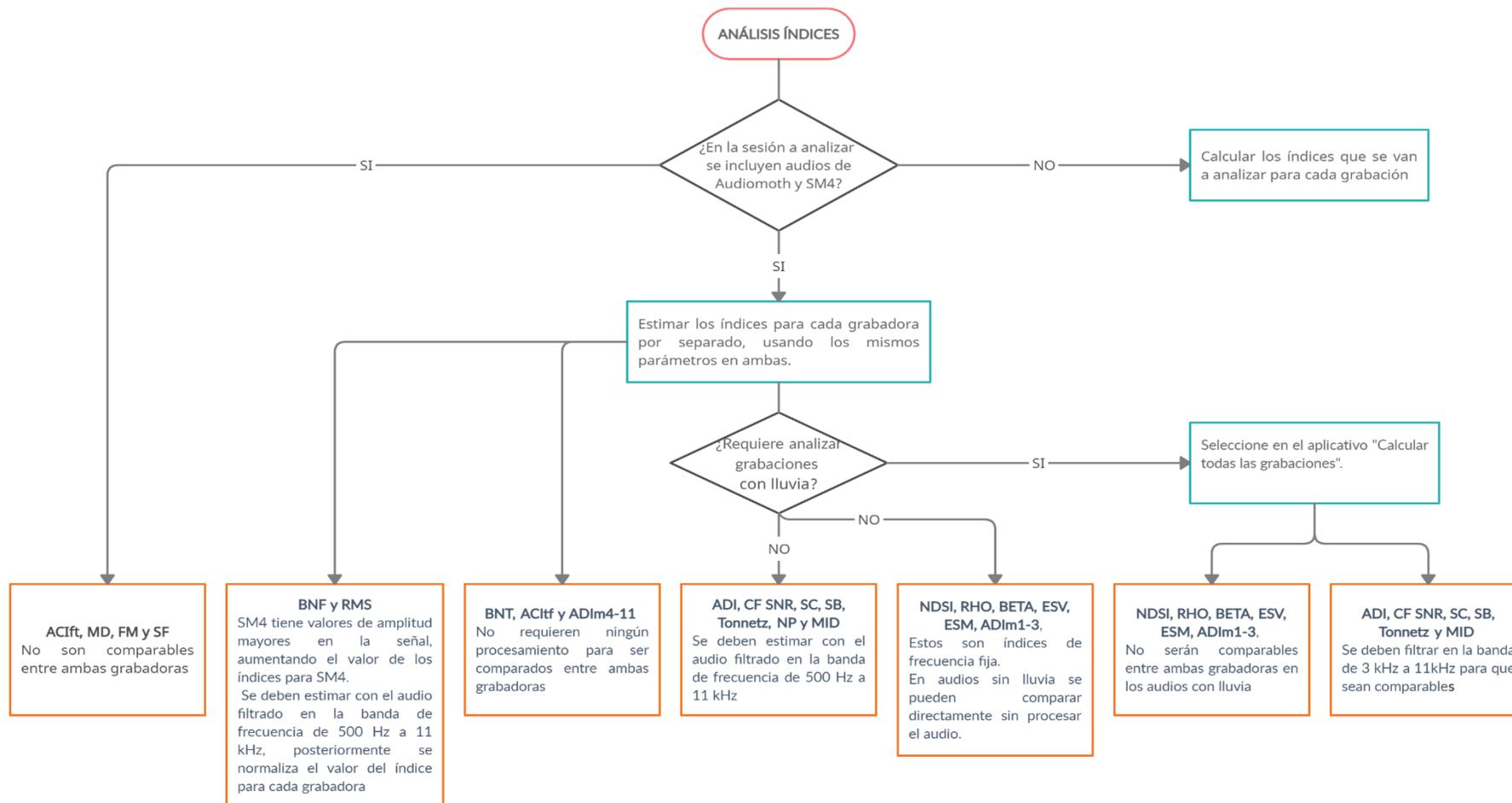
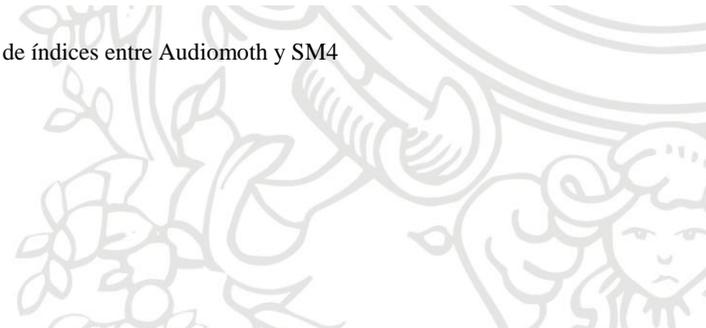


Figura 14. Diagrama de bloques para comparación de índices entre Audiomoth y SM4



Conclusiones

- Audiomoth y SM4 presentan un diferente comportamiento principalmente en las ganancias por encima de 11Khz y debajo de 500hz. Por lo tanto, al momento de comparar los índices para ambas grabadoras, se debe filtrar la señal a 11Khz, y hacer separación de las grabaciones con lluvia y sin lluvia de tal manera que este fenómeno no interfiera en la comparación.
- Debido a la diferencia de ganancia en frecuencias bajas y altas, y a que cada índice hace el análisis en bandas diferentes, es importante hacer un filtrado específico por índice. Para los índices ADI, CF, SNR, SC, SB, Tonnetz, MID y NP los audios de las grabaciones sin lluvia se deben filtrar en un rango de 500 Hz a 11 kHz y entre 3 kHz a 11 kHz cuando hay lluvia. RMS Y BNF siempre se deben filtrar de 500 Hz a 11 kHz y no afecta si hay lluvia. NDSI, RHO, BETA, ESM, ESV Y ADIm₁₋₁₁, no se deben filtrar para el análisis, pero no son similares en audios con lluvia.
- No se recomienda estimar los índices mezclando audios de diferentes grabadoras y se debe siempre tener presente calcularlos bajo los mismos parámetros (frecuencias de muestreo y ganancia de las grabadoras). De trabajos anteriores se concluye que la señal de audio se afecta por la degradación de los micrófonos; al igual que cambia cuando se usan diferentes tipos de cajas de Audiomoth. Con los resultados de este trabajo se puede concluir que los valores de los índices también van a variar debido al deterioro de los micrófonos y cambio en la caja protectora de las Audiomoth, por tanto, no se recomienda mezclar audios obtenidos con Audiomoths que tengan cajas diferentes y en el caso de la SM4 es importante revisar el estado de los micrófonos.
- Si se requiere hacer análisis en frecuencias altas (mayores a 11 kHz) no es conveniente grabar con SM4 porque su pérdida de ganancia afectará el estudio.
- La Audiomoth es una buena herramienta para hacer monitoreo acústicos, siempre que se estandarice un mismo tipo de caja para los diferentes puntos geográficos. A pesar, de no tener una ganancia tan alta como la SM4 capta todos los sonidos relevantes del ambiente y permite hacer un monitoreo para sonidos en altas frecuencias.

Referencias Bibliográficas

- [1] P. Caycedo, C. Gonzales. (2018). Caracterización y monitoreo de aves y paisajes sonoros en tres macro hábitats de la región de la Mojana. 7,8
- [2] Mitrović, D., Zeppelzauer, M., & Breiteneder, C. (2010). Features for Content-Based Audio Retrieval. *Advances in Computers*, 78(10), 71–150. [http://doi.org/10.1016/S0065-2458\(10\)78003-7](http://doi.org/10.1016/S0065-2458(10)78003-7)
- [3] Tchernichovski, O., Nottebohm, F., Ho, C., Pesaran, B., & Mitra, P. (2000). A procedure for an automated measurement of song similarity. *Animal Behaviour*, 59(6), 1167–1176. <http://doi.org/10.1006/anbe.1999.1416>
- [4] Depraetere, M., Pavoine, S., Jiguet, F., Gasc, A., Duvail, S., & Sueur, J. (2012). Monitoring animal diversity using acoustic indices: Implementation in a temperate woodland. *Ecological Indicators*, 13(1), 46–54. <http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.05.006>

- [5] Qi, J., Gage, S. H., Joo, W., Napoletano, B., & Biswas, S. (2007). Soundscape characteristics of an environment: a new ecological indicator of ecosystem health. In *Wetland and Water Resource Modeling and Assessment: A Watershed Perspective* (Vol. 20071553, pp. 201–214). <http://doi.org/10.1201/9781420064155>
- [6] De Coensel, B., Botteldooren, D., Debacq, K., Nilsson, M. E., & Berglund, B. (2007). Soundscape classifying ants. In *Internoise*. <http://doi.org/10.1260/135101007781447993>
- [7] 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(3), 868–873. <http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.11.005>
- [8] Farina, A., Pieretti, N., Salutari, P., Tognari, E., & Lombardi, A. (2016). The Application of the Acoustic Complexity Indices (ACI) to Ecoacoustic Event Detection and Identification (EEDI) Modeling. *Biosemiotics*, 9(2), 227–246. <http://doi.org/10.1007/s12304-016-9266-3>
- [9] Torija, A. J., Ruiz, D. P., & Ramos-Ridao, a F. (2013). Application of a methodology for categorizing and differentiating urban soundscapes using acoustical descriptors and semantic-differential attributes. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(1), 791–802. <http://doi.org/10.1121/1.4807804>
- [10] Pekin, B. K., Jung, J., Villanueva-Rivera, L. J., Pijanowski, B. C., & Ahumada, J. A. (2012). Modeling acoustic diversity using soundscape recordings and LIDAR-derived metrics of vertical forest structure in a neotropical rainforest. *Landscape Ecology*, 27(10), 1513–1522. <http://doi.org/10.1007/s10980-012-9806-4>
- [11] Duque-Montoya, D. C. (2018). Methodology for Ecosystem Change Assessing using Ecoacoustics Analysis. Universidad de Antioquia.
- [12] Towsey, 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. <http://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2013.11.007>
- [13] Gasc, A., Sueur, J., Pavoine, S., Pellens, R., & Grandcolas, P. (2013). Biodiversity Sampling Using a Global Acoustic Approach: Contrasting Sites with Microendemics in New Caledonia. *PLoS ONE*, 8(5), e65311. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0065311>
- [14] Boelman, N. T., Asner, G. P., Hart, P. J., & Martin, R. E. (2007). Multi-trophic invasion resistance in Hawaii: Bioacoustics, field surveys, and airborne remote sensing. *Ecological Applications*, 17(8), 2137–2144. <http://doi.org/10.1890/07-0004.1>
- [15] Sueur, J., Pavoine, S., Hamerlynck, O., & Duvail, S. (2008). Rapid Acoustic Survey for Biodiversity Appraisal. *PLoS ONE*, 3(12), e4065. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0004065>
- [16] Klapuri, A., & Davy, M. (Eds.). (2007). Signal processing methods for music transcription, chapter 5. Springer Science & Business Media.
- [17] Harte, C., Sandler, M., & Gasser, M. (2006). “Detecting Harmonic Change in Musical Audio.” In *Proceedings of the 1st ACM Workshop on Audio and Music Computing Multimedia* (pp. 21–26). Santa Barbara, CA, USA: ACM Press. doi:10.1145/1178723.1178727.
- [18] Kasten, E. P., Gage, S. H., Fox, J., & Joo, W. (2012). The remote environmental assessment laboratory’s acoustic library: An archive for studying soundscape ecology. *Ecological Informatics*, 12, 50–67. <http://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2012.08.001>

- [19] Rodriguez, A., Gasc, A., Pavoine, S., Grandcolas, P., Gaucher, P., & Sueur, J. (2014). Temporal and spatial variability of animal sound within a neotropical forest. *Ecological Informatics*, 21, 133–143. <http://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2013.12.006>
- [20] Towsey, M. (2013). Noise removal from waveforms and spectrograms derived from natural recordings of the environment. Extraído de <http://eprints.qut.edu.au/61399/>
- [21] M.D.A. Scarpelli, M. Ribeiro, C. Teixeira. (2020). What does Atlantic Forest soundscapes can tell us about landscape?. Extraído de <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107050>
- [22] A. Fairbrass, P. Rennert, C. Williams, H. Titheridge, K. Jone. (2017). Biases of acoustic indices measuring biodiversity in urban áreas.
- [23] Open Acoustic Devices. (2020). AudioMoth Operation Manual
- [24] A. Hill, P. Prince, J. Snaddon, P. Doncaster, A. Rogers. (2019). AudioMoth: A low-cost acoustic device for monitoring biodiversity and the environment
- [25] Wild life acoustic. (2019). Grabador de Canto SM4 Manual de usuario. 62-65
- [26] J. Lopez, C. Isaza, A. Sucerquia, C. Sanchez, J. Daza. (2020). Setting up the Audiomoth recorder for wildlife monitoring in the rainforest.
- [27] T. Bradfer-Lawrencea, N. Bunnefelda, N. Gardnera, S. Willisb, D. Dent. (2020). Rapid assessment of avian species richness and abundance using acoustic índices. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106400>
- [28] Bedoya, C., Isaza, C., Daza, J. M., & López, J. D. (2017). Automatic identification of rainfall in acoustic recordings. *Ecological Indicators*, 75, 95–100. <http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.018>

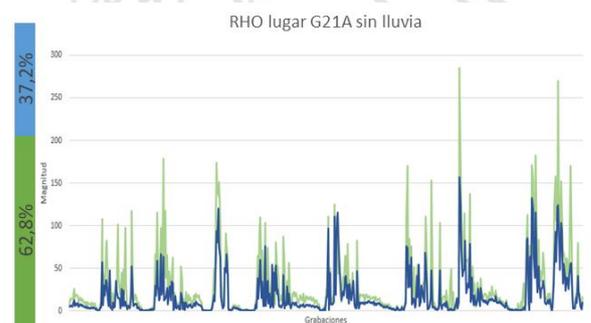
Anexo

Índices frecuencia Fija

- BETA**



- RHO**



- **NDSI**



- **ESM**



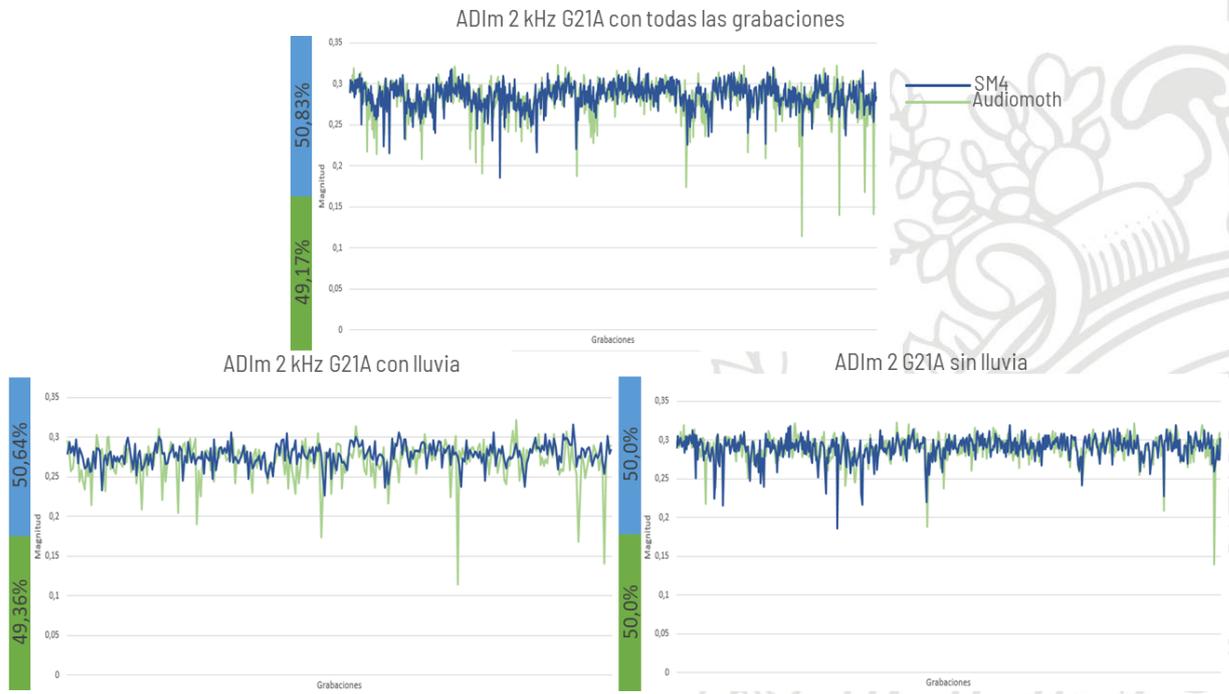
- **ESV**



- **ADIm1**



- **ADIm2**



- **ADIm3**



Índices comparables audios todas las frecuencias

- **ADIm4**



- **ADIm5**

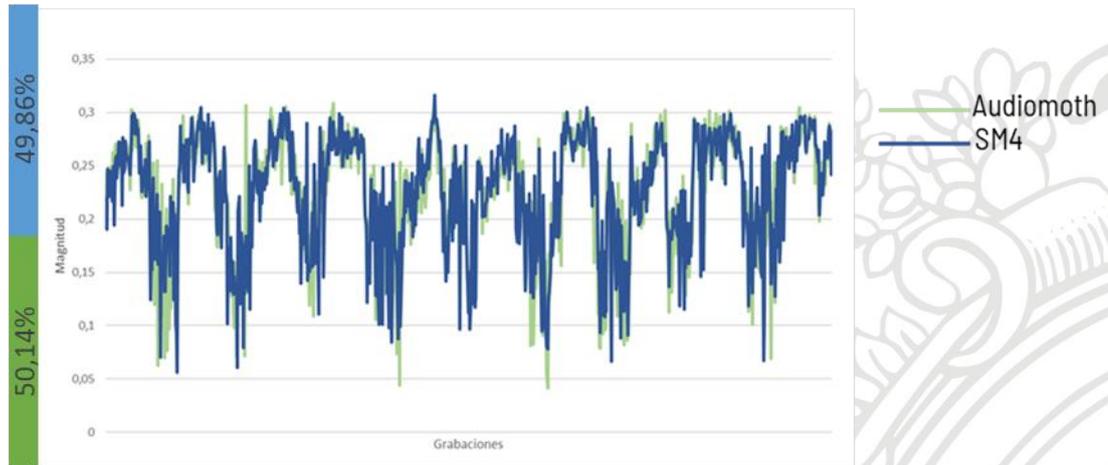


- **ADIm6**



- **ADIm7**

ADIm 7 todos los audios



- **ADIm8**

ADIm 8 todos los audios



- **ADIm9**

ADIm 9 todos los audios



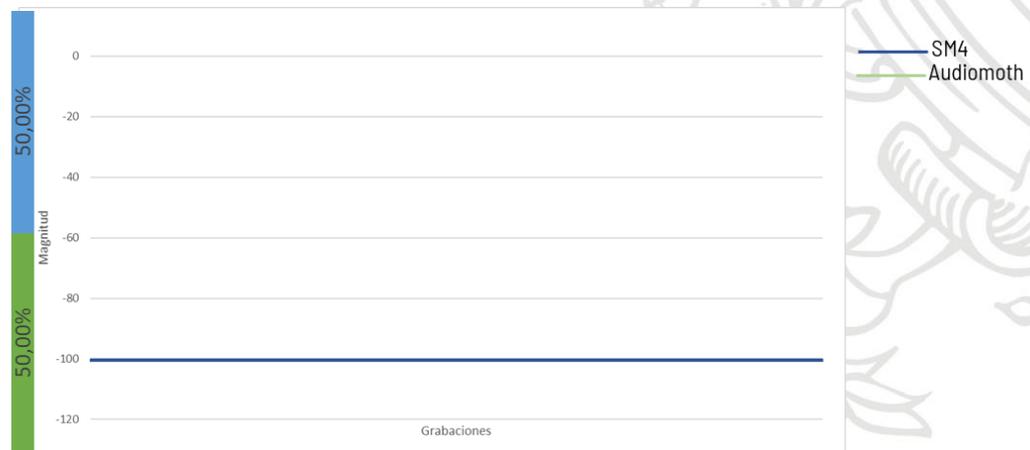
- **ADIm10**



- **ADIm11**



- **BNT**



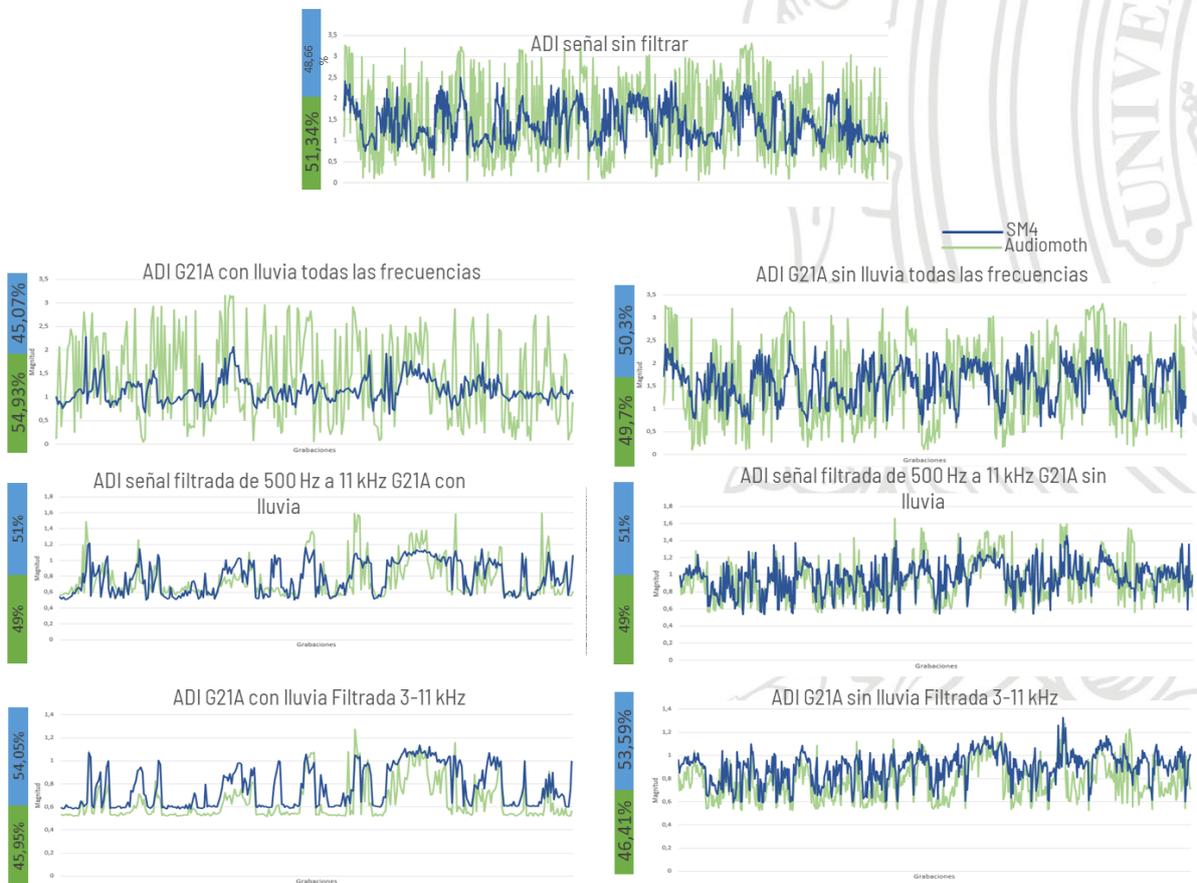
*Los valores de SM4 y Audiomoth son idénticos (están superpuestos)

- ACIf

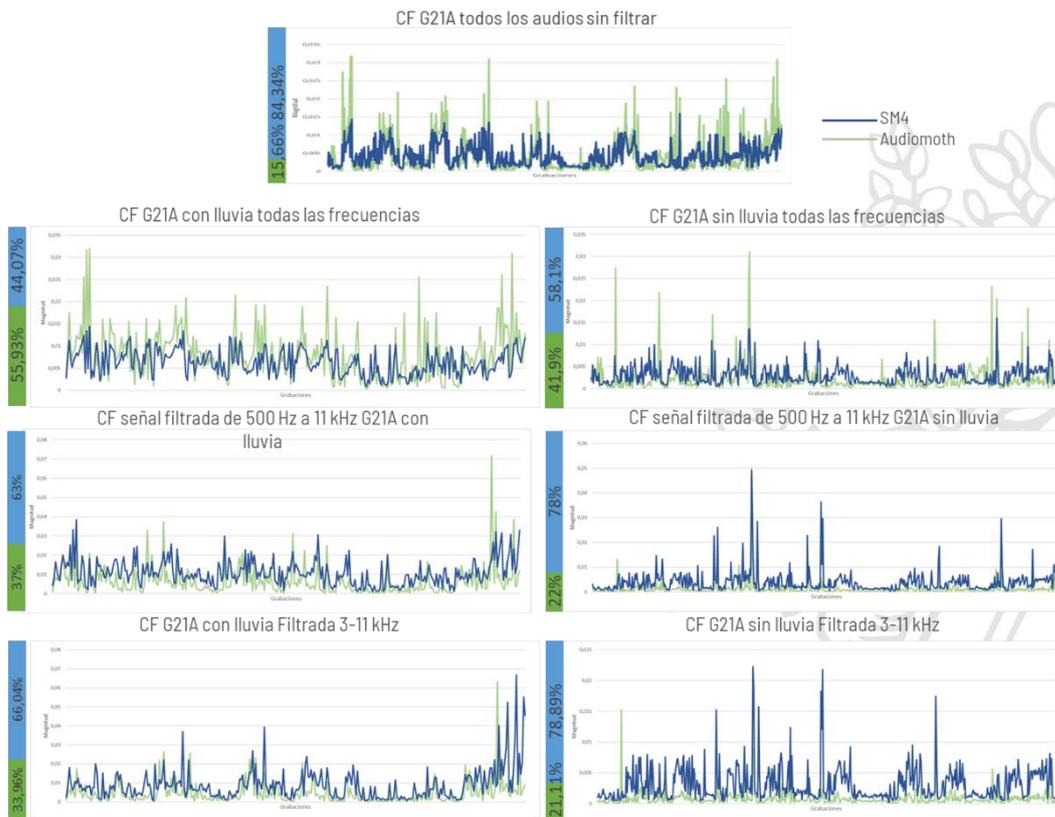


Índices requieren filtrarse

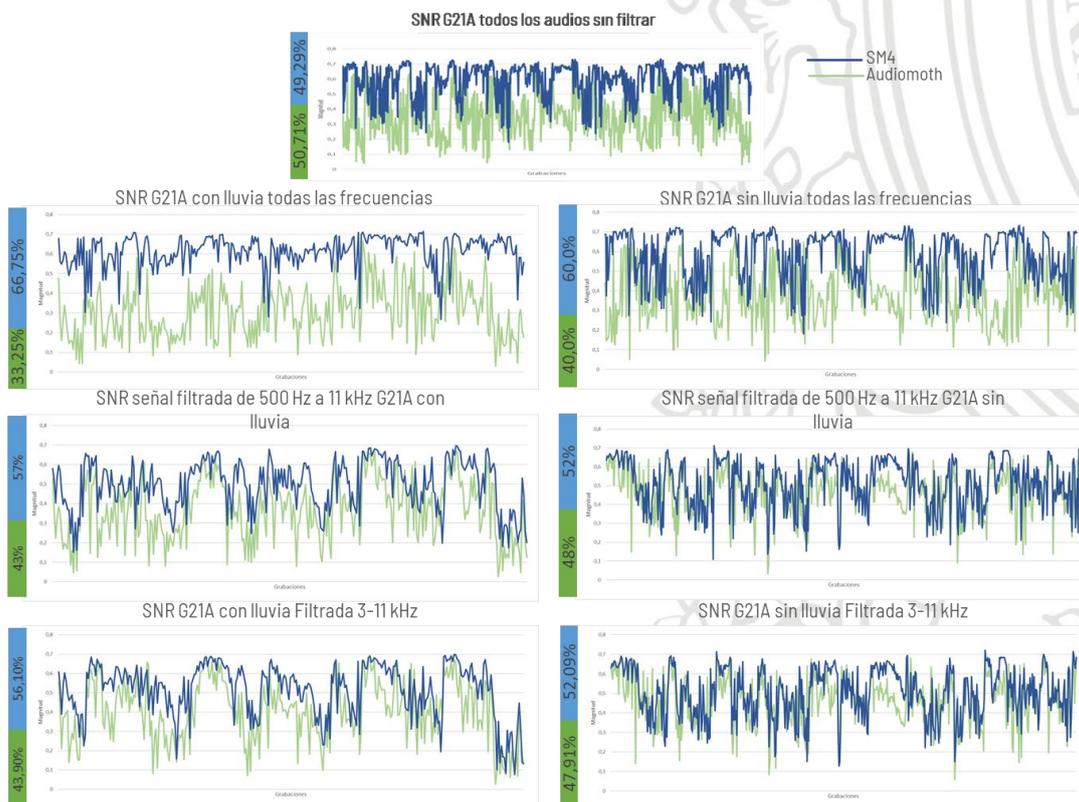
- ADI



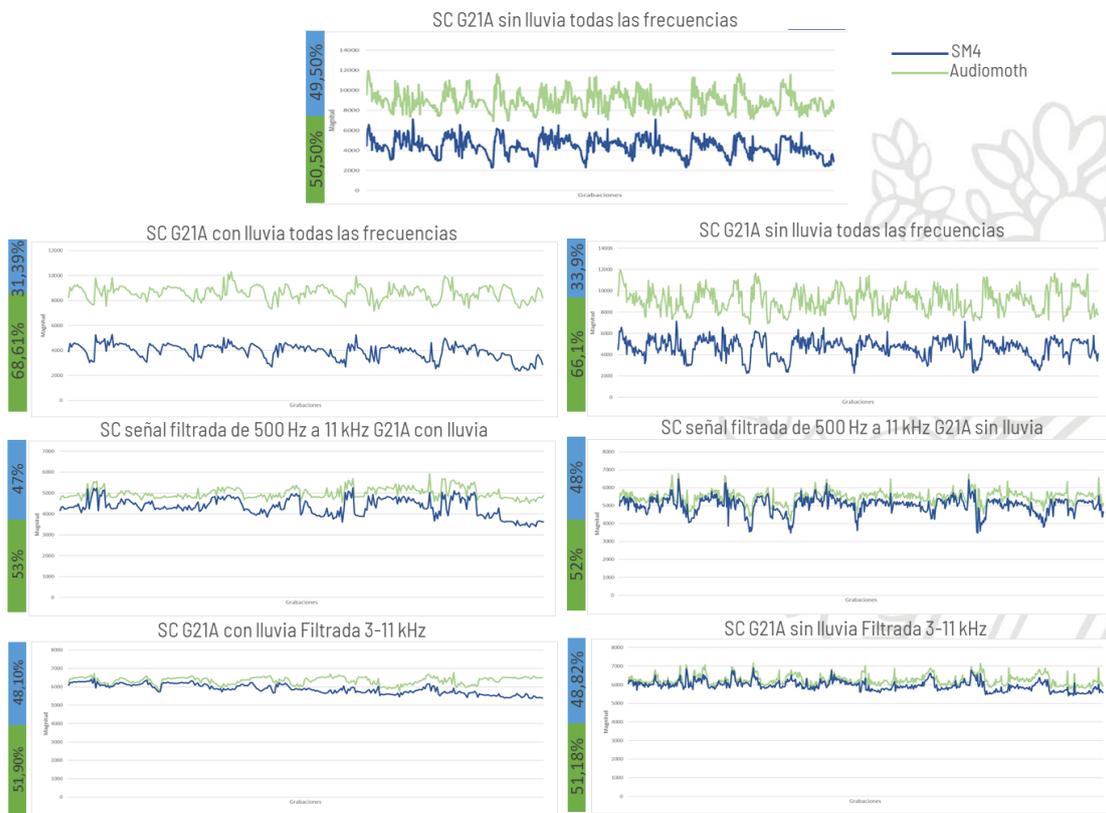
- CF



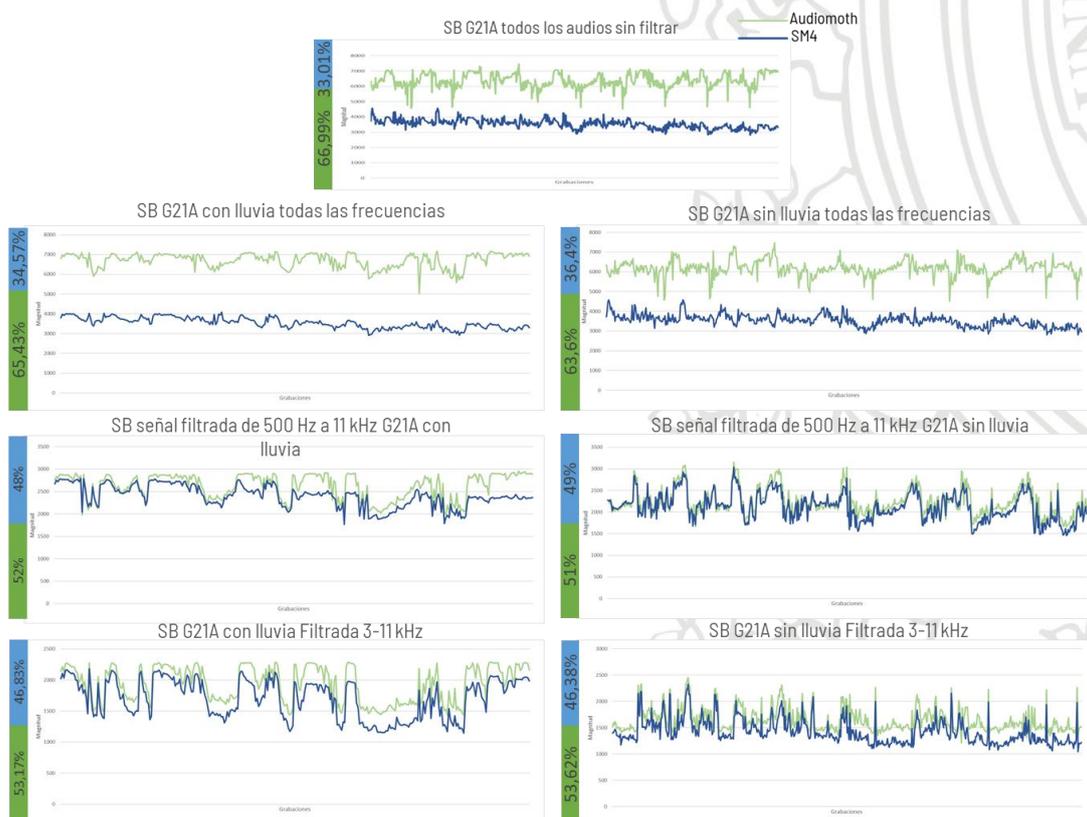
- SNR



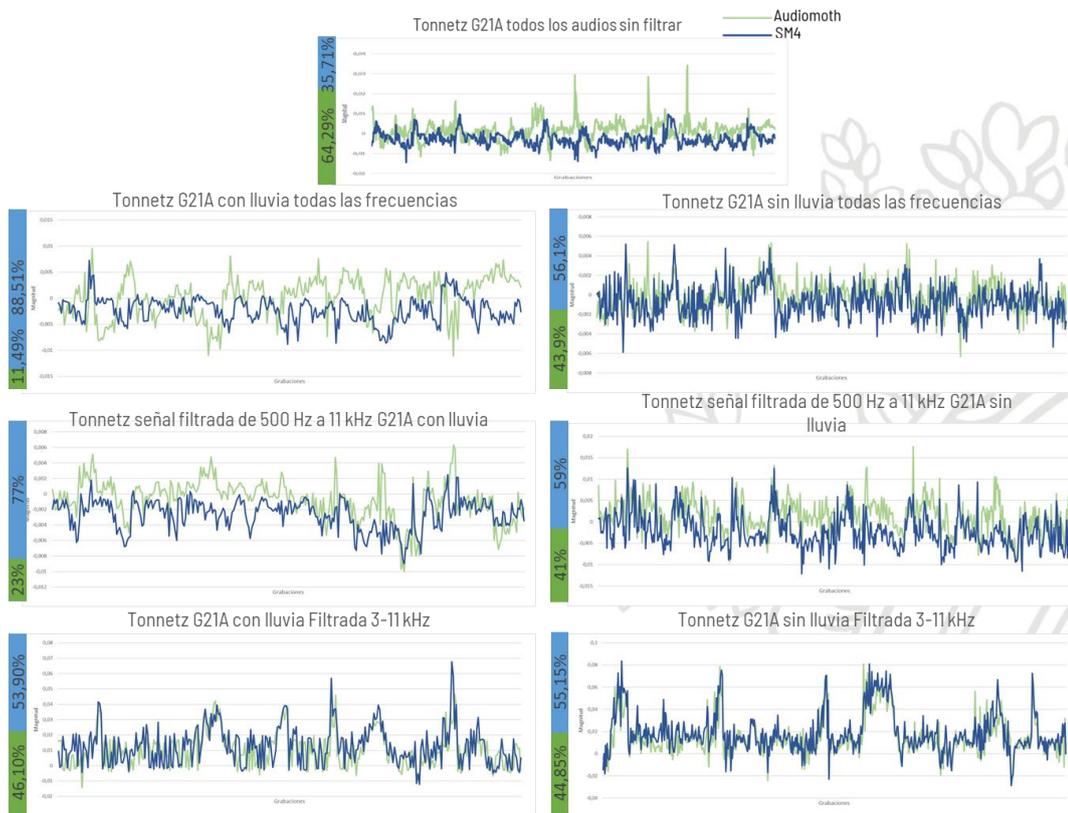
- **SC**



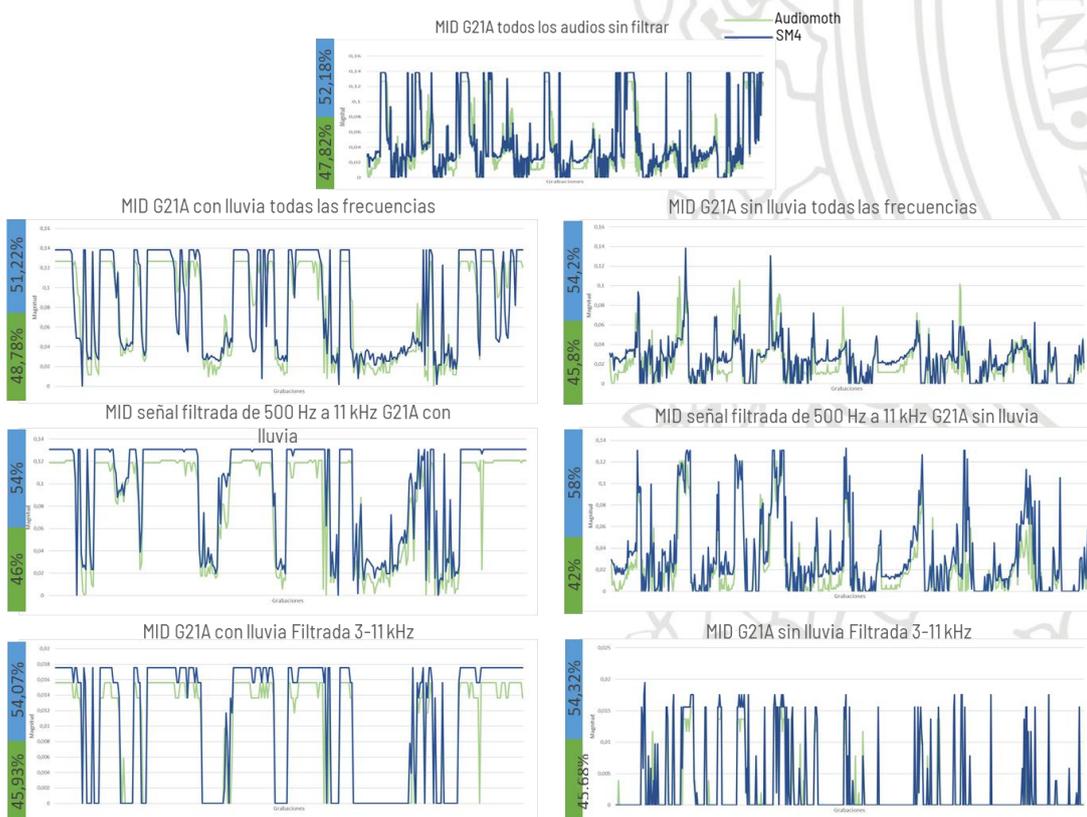
- **SB**



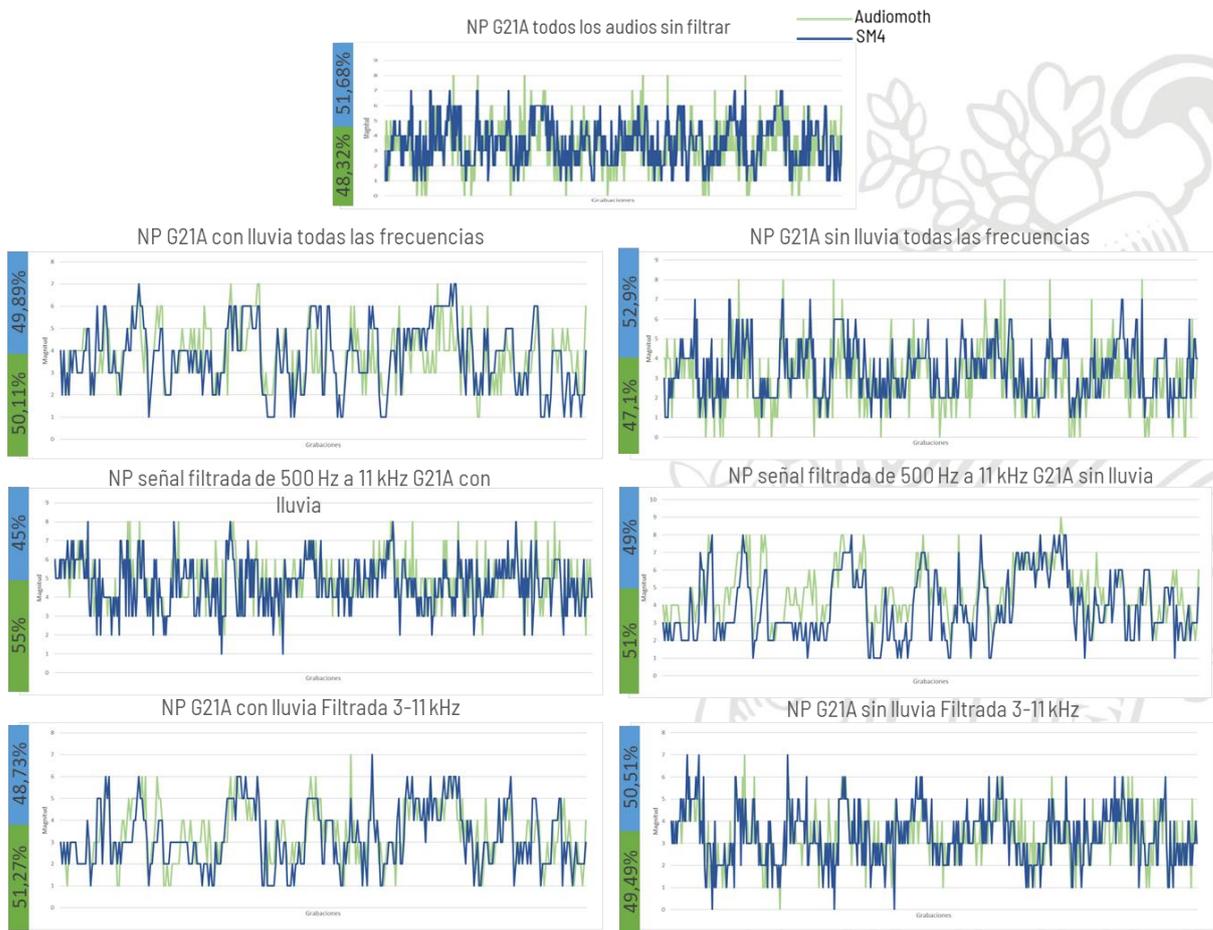
- **Tonnetz**



- **MID**



- NP

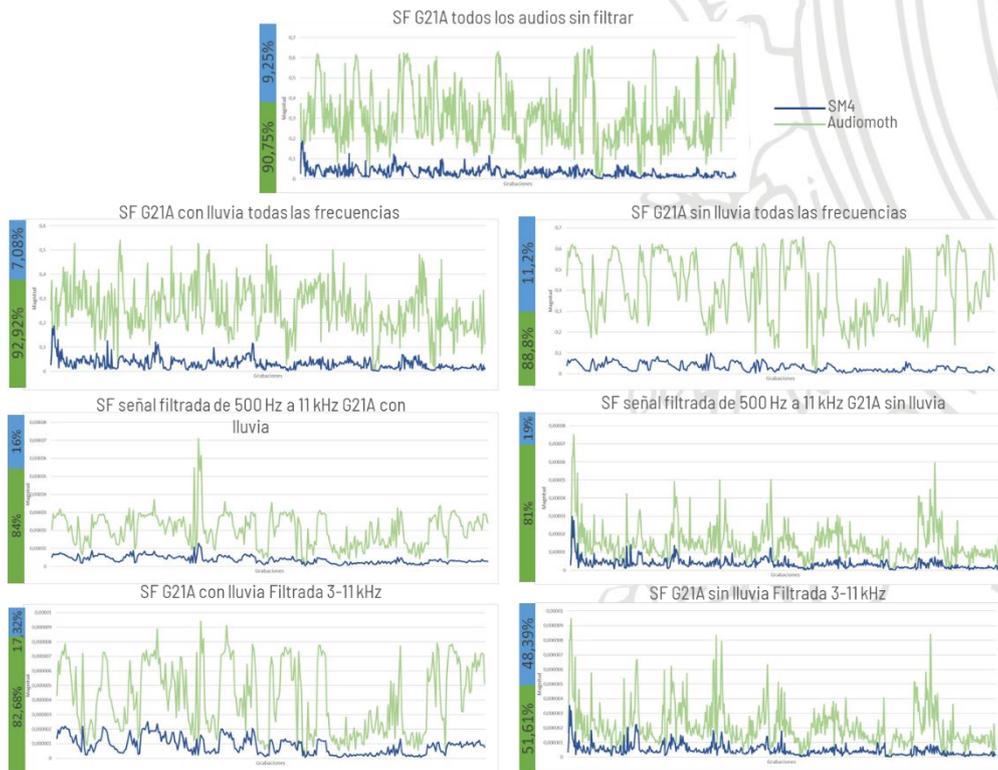


Índices no comparables

- ACIf



- SF



- FM**



- MD**

