

Diseño, prototipado y pruebas acústicas de estuches de protección para grabadoras AudioMoth mediante tecnologías de fabricación digital

Design, prototyping, and acoustic testing of protective cases for AudioMoth recorders using digital fabrication technologies


Farith Tabash-Pérez¹, Roberto Vargas-Masís²

F. Tabash-Pérez, R. Vargas-Masís, "Diseño, prototipado y pruebas acústicas de estuches de protección para grabadoras AudioMoth mediante tecnologías de fabricación digital," *IDI+*, vol. 8, no 2, pp. 24-42, Ene., 2026.

 <https://doi.org/10.18845/ridip.v8i2.8429>

Fecha de recepción: 20 de marzo de 2025
Fecha de aprobación: 10 de noviembre de 2025

1. Farith Tabash-Pérez
Investigador, Laboratorio de Fabricación (Fab Lab) Kä Träre, Vicerrectoría de Investigación Universidad Estatal a Distancia (UNED), San José, Costa Rica
ftabash@uned.ac.cr
 0000-0003-0974-5060

2. Roberto Vargas-Masís
Investigador, Laboratorio de Investigación e Innovación Tecnológica (LIIT), Vicerrectoría de Investigación, Universidad Estatal a Distancia (UNED), San José, Costa Rica
rovargas@uned.ac.cr
 0000-0003-1244-4381

Resumen

El monitoreo acústico del ambiente se ha incrementado en los últimos años y es considerada una técnica poco invasiva para estudiar fauna silvestre. Dicho aumento ha favorecido el desarrollo de nuevas tecnologías, por ejemplo, la placa AudioMoth. Esta pequeña placa electrónica registra sonidos de la naturaleza, pero bajo condiciones ambientales adversas, por lo que puede dañarse con facilidad; aunque se han desarrollado protectores, su acceso es limitado. Actualmente, se han implementado protectores alternativos con diferentes diseños, sin embargo, no se ha evaluado su funcionalidad a través de pruebas acústicas. Debido a ello, en este proyecto, se diseñaron y evaluaron tres prototipos confeccionados mediante tecnologías de fabricación digital a partir de sugerencias de personas usuarias expertas en bioacústica. Se comprobó su desempeño en un ambiente controlado, un ecosistema húmedo y un ecosistema seco mediante la comparación de índices acústicos tradicionales. Finalmente, los resultados muestran que el mejor desempeño lo obtuvo el prototipo de protector a base de resina, pues, dadas las características del material, brinda la mayor protección y modifica en menor grado las variables acústicas al compararlo con la protección mediante bolsa plástica que se ha utilizado como método tradicional. A partir de los resultados, se brindaron recomendaciones de diseño para el prototipo seleccionado. Así mismo, el diseño y evaluación de estos protectores puede evitar futuros daños en la placa y mantener su funcionalidad, a pesar de las condiciones de los ecosistemas tropicales.

Palabras clave

Monitoreo acústico; estuche protector; prototipado; AudioMoth; impresión digital.

Abstract

Acoustic monitoring of the environment has increased in recent years and is considered a minimally invasive technique for study wildlife. This increase has favored the development of new technologies, for example, the AudioMoth board. This small electronic board records sounds from nature, but under adverse environmental conditions, it can be easily damaged; although protectors have been developed, access to them is limited. Currently, alternative shields with different designs have been implemented, but their functionality has not been evaluated through acoustic testing. Three prototypes made using digital fabrication technologies were evaluated based on suggestions from users who are experts in bioacoustics. Their performance was tested in a controlled environment, a humid ecosystem and a dry ecosystem by comparing traditional acoustic indices. The results show that the best performance was obtained by the resin-based protector prototype, since, given the characteristics of the material, it provides the greatest protection and modifies the acoustic variables to a lesser degree when compared to the protection by means of a plastic bag that has been used as a traditional method. Based

on the results, design recommendations were provided for the selected prototype. The design and evaluation of these protectors can prevent future damage to the plate and maintain its functionality, despite the conditions of tropical ecosystems.

Keywords

Acoustic monitoring; protective case; prototyping; AudioMoth; digital printing.

Introducción

El monitoreo acústico surge como una técnica de alto valor ecológico, no invasiva, en la determinación de la biodiversidad de diversos ecosistemas [1]. Lo cual brinda un marco respecto del avance tecnológico en el desarrollo de nuevos dispositivos de grabación de sonidos creados en zonas templadas. Por esta razón, desarrollar estuches de protección para estas grabadoras y adaptarlos a las condiciones de las regiones tropicales se ha convertido en una prioridad [2].

Las grabadoras AudioMoth surgen como una opción de bajo costo para el monitoreo de fauna silvestre [3]. Son pequeñas placas electrónicas que permiten el registro acústico sin compresión de audio. Estos dispositivos son una herramienta de investigación en espacios como bosques maduros y selvas tropicales, en los que las condiciones climáticas son particularmente adversas.

Estos dispositivos cumplen con la función de registro acústico, sin embargo, al estar expuestos a condiciones ambientales adversas, pueden dañarse con facilidad, generando pérdida de la placa, así como de datos recolectados. Además, la oferta de estuches de protección alternativos a los desarrollados por AudioMoth es reducida y no se cuenta con pruebas que respalden su funcionalidad. Por lo que bolsas de plástico de cierre hermético son utilizadas para “proteger” estas placas, al menos de la lluvia.

Estos prototipos son diseñados en Laboratorios de Fabricación (*Fab Lab*, por sus siglas en inglés), los cuales son espacios para crear, guiar e inventar, brindando acceso a nuevos materiales y tecnologías que permiten la innovación en cualquier lugar y para cualquier persona. En estos laboratorios, se utilizan tecnologías de fabricación digital como impresión 3D, corte láser, CNC u otros [4].

Los Laboratorios de Fabricación son espacios abiertos donde se pueden experimentar y prototipar soluciones variadas a distintas situaciones o problemas por resolver y por distintos medios. En otras palabras, facilita las tecnologías, los materiales y los entornos a cualquier persona para que haga (casi) cualquier tarea [4].

Antes de elaborar un prototipo, es preciso trabajar en el diseño, por lo que se plantea la definición

de requerimientos y requisitos. Para hacerlo, se emplea la metodología de Design Thinking. Al combinar estos elementos, se generarán bases más sólidas, facilitando el conocimiento de las necesidades reales para el desarrollo de los modelos o prototipos; seguido por distintas pruebas de prototipado en físico y una continua mejora en su desarrollo [5].

Con los prototipos se buscan las maneras más eficientes de transformar las ideas en productos tangibles (la materialización de la idea) y ejecutar pruebas en varios escenarios reales, que demuestren el desempeño del producto respecto a la propuesta inicial [6]. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es generar prototipos de estuches de protección para las grabadoras de sonido AudioMoth y comparar su funcionalidad mediante la ejecución de pruebas acústicas en diferentes condiciones climáticas.

Metodología

Para la generación de prototipos, se determinaron los requisitos y requerimientos que permitieron la funcionalidad básica de los estuches de protección, según las consultas que se realizaron a personas usuarias de estas grabadoras en el área de Biología y Bioacústica. Con esta información, se elaboró una tabla con los requisitos y distintos elementos de referencia de protectores ya existentes.

Las características establecidas durante este proceso se describen en la Tabla I, donde se consideran requisitos como características obligatorias y los requerimientos como características necesarias, más no indispensables, para su funcionamiento.

Uno de los requisitos establecidos para el prototipo fue la impermeabilidad del material, ya que el material seleccionado debe proteger la placa de la lluvia y otras condiciones ambientales como la humedad. Por lo tanto, el diseño y los materiales de fabricación digital utilizados debieron adaptarse y utilizar tecnologías que cumplan con este requisito. Durante las pruebas, no se contó con condiciones de lluvia dada la época del año, pero se establecieron ambientes diversos de pruebas respecto a la humedad.

Se determinó que los prototipos debieron ser generados con materiales y métodos de fabricación variados, para poner a prueba sus posibles efectos en las grabaciones de la placa AudioMoth; tanto en usabilidad como reacción a la acústica y reacción al ambiente para cada prototipo.

El tipo de tecnología es determinante en el proceso de prototipado y fabricación digital, por lo que para los prototipos se utilizaron tecnologías (según corresponde a cada material) como la impresión 3D; tanto la impresión más tradicional de Modelado por Deposición Fundida (FDM, por sus siglas en inglés) como la impresión estereolitografía (SLA, por sus siglas en inglés). También se emplearon otras tecnologías como el corte láser de Control Numérico Computarizado (CNC) y el termoformado.

TABLA I

LISTADO DE LOS REQUISITOS Y REQUERIMIENTOS DETERMINADOS A PARTIR DE LAS CONSULTAS A PERSONAS EXPERTAS Y USUARIAS DE LAS GRABADORAS DE SONIDO Y SUS PROPUESTAS DE SOLUCIÓN

| Requisitos | Propuesta |
|---|---|
| Dimensiones de 58 mm x 48 mm x 15 mm para la placa AudioMoth. | Ajustar el diseño a las dimensiones de la placa AudioMoth. |
| Que el material sea impermeable. | Utilizar materiales de poca porosidad. |
| Que el material no recaliente la placa. | Disminuir el contacto directo de la placa con el material del estuche. |
| Que el protector posea una abertura para el micrófono al lado derecho abajo. | Orificio inferior. |
| Que se realice una fabricación digital de los diseños propuestos. | Fabricar en un <i>Fab Lab</i> , con tecnologías de fabricación digital. |
| Que el diseño proteja la placa de agentes externos (bióticos y abióticos). | Utilizar materiales duros o flexibles. |
| Que utilice una membrana IP67 permeable al sonido, pero impermeable al agua. | Utilizar membrana IP67. |
| Proteger la placa de la abrasión con los materiales a producir los prototipos. | Colocar espacios libres entre la placa y el case protector. |
| Que la placa no toque el material directamente. | Colocar un soporte con almohadilla. |
| Requerimientos | |
| Que sea portable. | Diseñar de acuerdo con las dimensiones de la placa AudioMoth. |
| Que el ensamblado sea sencillo. | |
| Color negro, verde u oscuro o que sea transparente. | Utilizar materiales de ciertas totalidades o permitan su recubrimiento. |
| Que posea un punto de agarre para amarros. | Colocar métodos para sujetar amarres (orificios). |
| Que se puedan grabar logos de los desarrolladores. | Utilizar materiales que se puedan ajustar al diseño. |
| Fácil colocación de la placa. | Diseño vertical u horizontal. |
| Que sea de bajo costo de impresión, según los precios del mercado. | Utilizar diseños de figuras simples (poco complejas), que faciliten su fabricación. |
| Que las dimensiones del diseño puedan modificarse según los cambios en el tamaño de la placa. | Utilizar modelos que se puedan alterar las medidas. |

Considerando la disponibilidad de lo anterior en el Laboratorio, los materiales utilizados fueron: Mayku Sheets que posee la ventaja de una mejor protección a líquidos y el material es reciclable [7]; resina fotosensible con la ventaja de una mayor calidad de impresión y protección a líquidos [8]; poliuretano termoplástico (TPU 95A) que posee un precio accesible, es flexible y resistente [9]. Por último, acrílico que brinda la facilidad por costo, rápida fabricación, impermeabilidad y facilidad de mecanización y moldeo [10].

Con los tres prototipos ya desarrollados, se colocaron cuatro grabadoras AudioMoth (tres prototipos y una grabadora de control protegida con una bolsa plástica) en tres ambientes con condiciones ambientales distintas, para efectuar las pruebas acústicas y verificar el funcionamiento mediante su comparación a través de índices acústicos.

Los ambientes en los que se evaluaron los prototipos de protectores fueron:

- Ambiente semicontrolado: UNED, San José (9.940515° N., -84.047635° O.)
- Ambiente húmedo: San Joaquín, Heredia (10.008626° N., -84.137162° O.)
- Ambiente seco: Guayabo, Puriscal, San José (9.848277° N., -84.262020° O.)

Se colocaron las grabadoras AudioMoth y se configuraron para grabar durante 2 horas, con grabaciones cada diez minutos, en cada ambiente. Las grabaciones se realizaron en formato “wav” con una frecuencia de muestreo de 48 kHz y 16 bits de resolución [11], [12]. Además, los audios recolectados se analizaron con el programa R, utilizando el paquete Sinax para extraer la información acústica de las grabaciones, utilizando índices acústicos [13].

Se utilizaron índices acústicos tradicionales en estudios de paisaje sonoro como el índice de bioacústica (BIO), índice de diversidad acústica (ADI), índice de diferencia normalizada del paisaje sonoro (NDSI) e índice de picos (NP). Estos caracterizan variables espectrales de elementos como biofonías (sonidos de origen biológico), geofonías (sonidos naturales que no son de origen biológico) y antropofonías (sonidos de origen humano) para evaluar los prototipos desarrollados.

Se compararon los índices acústicos para cada tratamiento por sitio, mediante una prueba estadística robusta [14], [15] y se realizaron comparaciones Lincoln *a posteriori* [14] que utilizan el ajuste de Dun. Los análisis estadísticos se realizaron con el lenguaje de programación R versión 4.0.2 [16] con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$ y sin comparar los resultados entre sitios de muestreo.

Resultados

Tras establecer los requisitos, requerimientos, materiales y tecnologías, se generaron los primeros bocetos de los protectores (Figura 1A), lo que permitió encontrar puntos de mejora, tanto en diseño como fabricación, previo a la impresión de los modelos 3D.

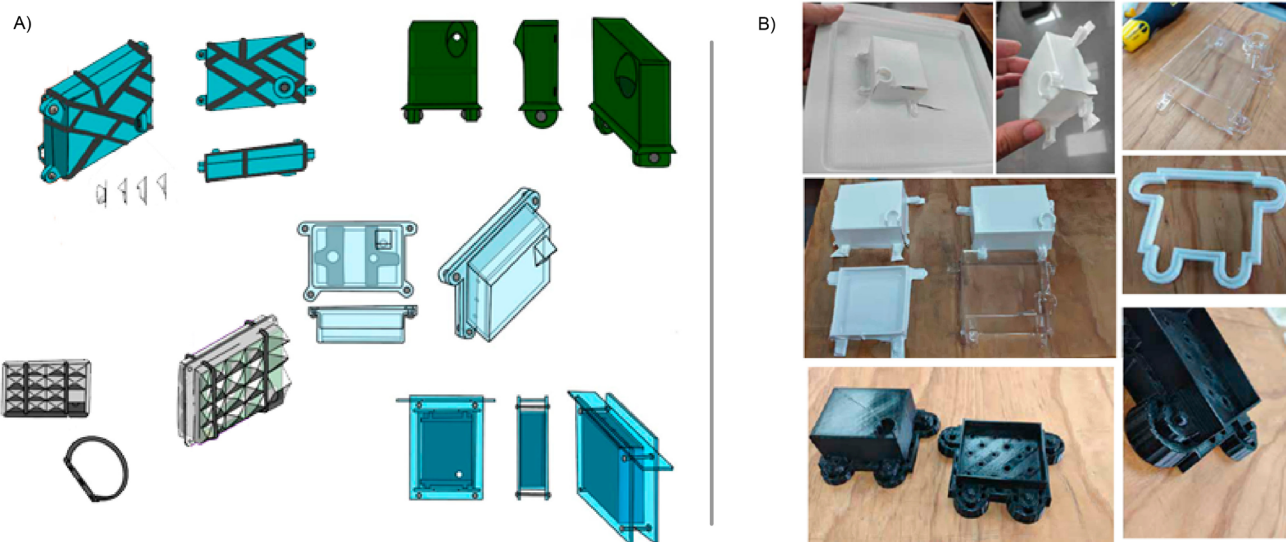


Fig. 1. Diseños digitales y pruebas iniciales de los prototipos de protectores para AudioMoth. (A): Imágenes de bocetos a partir de los requisitos y requerimientos recopilados con expertos. (B): Pruebas de los procesos de prototipado (positivos y negativos) para los protectores de AudioMoth.

Una vez definidos los modelos 3D de las propuestas, se realizaron pruebas de fabricación, para comprobar el comportamiento de los materiales, realimentar el diseño y volver más eficiente la fabricación según cada material.

Para cada prototipo, se realizaron moldes preliminares a fin de evaluar los tipos de ensamble, aspectos de mejora en la fabricación digital, tiempo de fabricación, la facilidad de generar el prototipo y el comportamiento de los materiales en las condiciones del Laboratorio, entre otros factores (Figura 1B).

Los modelos contemplan un seguro interno impreso en TPU 95A para prevenir golpes a la placa, y se utilizó un parche permeable al sonido, pero impermeable al agua, colocado en los orificios por donde ingresan las ondas de sonido.

Protector 1 Termoformadora (TEF)

El prototipo 1 (figura 2) fue fabricado, en su mayor parte, por medio de la termoformadora, por lo que fue necesario contar con el molde negativo en impresión 3D. En este caso, se realizó por medio de impresión 3D de tecnología de FDM en materiales como el políácido láctico (PLA). Además, se utilizó un seguro impreso en 3D con material flexible TPU 95A para asegurar los bordes, limitar la entrada de lluvia al ajustar los bordes de los componentes y brindando más solidez al modelo.

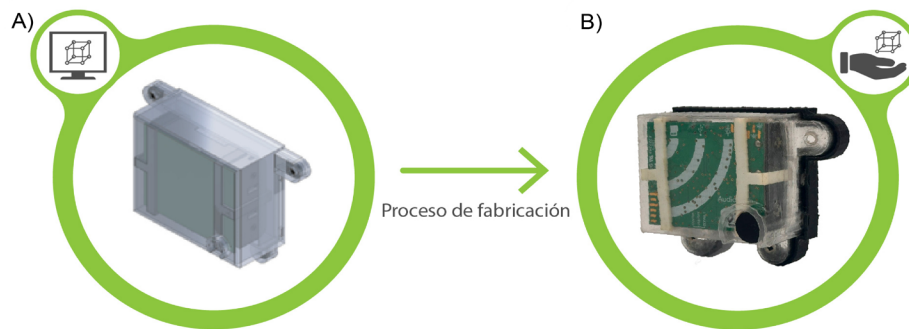


Fig. 2. Prototipo del protector 1 (termoformadora) para la grabadora AudioMoth. (A): Prototipo versión virtual (modelo 3D). (B): prototipo versión física.

Protector 2 Resina (RES)

El segundo prototipo se realizó con impresión 3D, con tecnología SLA y resina fotosensible. Este prototipo no tuvo requerimientos extras para su fabricación, por lo que se procedió a realizar un modelo 3D en su totalidad, para luego ser exportado a formatos permitidos en la tecnología de impresión 3D (en este caso formato .stl).

Este prototipo contempla dos partes: la carcasa protectora y la tapa, además, su diseño es más vertical, ambos son en resina, la cual requiere un postproceso, que consiste en un curado o lavado de las piezas en alcohol isopropílico y, después, un proceso para endurecer la pieza, el cual se realiza con un dispositivo que dispara rayos ultravioletas (Figura 3).

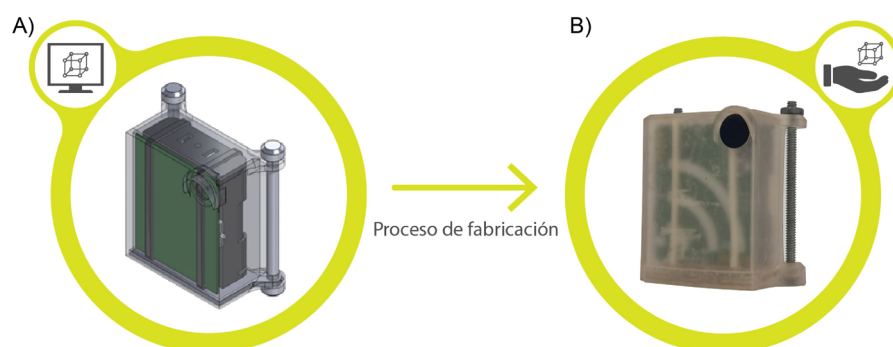


Fig. 3. Prototipo del protector 2 (resina) para la grabadora AudioMoth. (A): Prototipo versión virtual (modelo 3D). (B): Prototipo versión física.

Protector 3 TPU95 (TPU)

Este prototipo posee una combinación de varios materiales y tecnologías de fabricación digital. La carcasa protectora se fabricó con impresión 3D de tecnología FDM y material TPU95 A, lo que lo hace flexible. Se fabricaron los laterales de agarre y la tapa inferior con acrílico y corte láser; por último, el techo para evitar la lluvia directa al dispositivo fue fabricado por medio de una termoformadora (Figura 4).

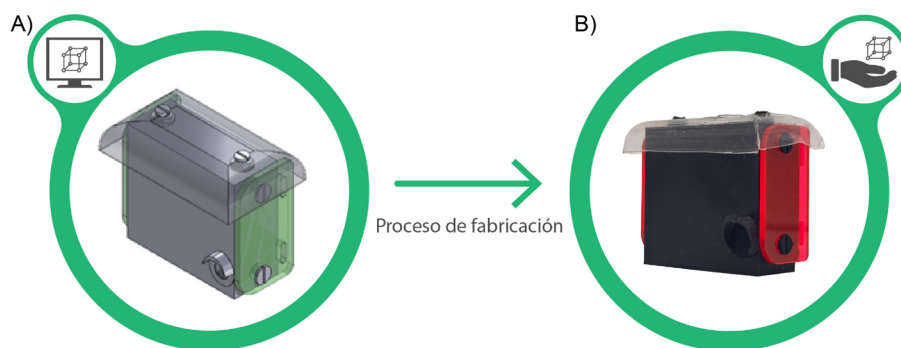


Fig. 4. Prototipo del protector 3 (TPU) para la grabadora AudioMoth. (A): Prototipo versión virtual (modelo 3D). (B): Prototipo versión física.

Comparación de variables acústicas en cada uno de los prototipos

Se compararon los índices acústicos para el sitio UNED. Este sitio se tomó como referencia, ya que las condiciones de grabación se controlaron en un espacio con el menor ruido posible.

Se encontraron diferencias significativas entre todos los prototipos evaluados (figura 5) para el índice BIO ($KW = 26,88$; $p < 0,05$, $gl = 99$), ADI ($KW = 64,11$; $p < 0,05$, $gl = 99$), NDSI ($KW = 49,86$; $p < 0,05$, $gl = 99$) y NP ($KW = 42,60$; $p < 0,05$, $gl = 99$).

Mediante líneas que unen los prototipos que presentaron diferencias significativas, se puede notar, en la figura 5, que el prototipo de resina posee las mayores similitudes respecto al método tradicional utilizado mediante una bolsa plástica; los prototipos de termoformadora y TPU presentan las variantes con esta referencia.

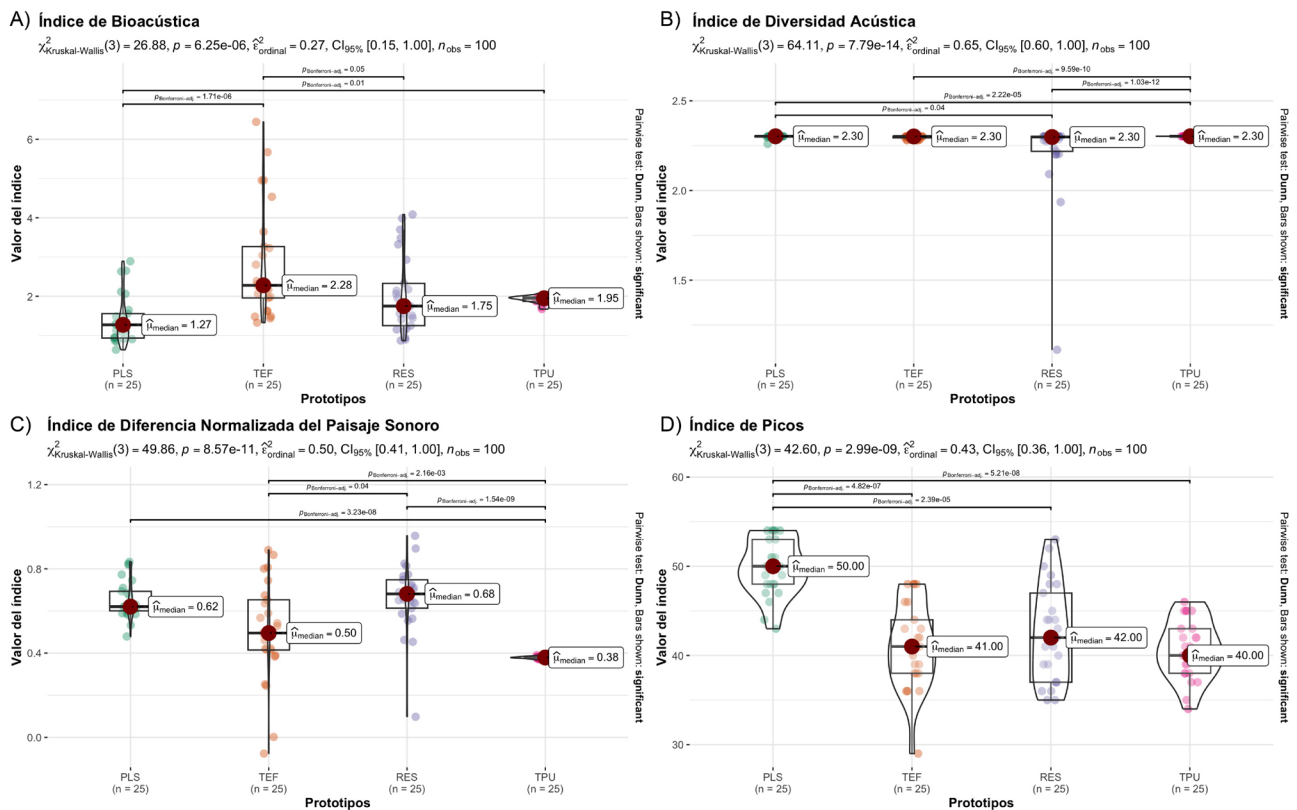


Fig. 5. Comparación del desempeño de las grabadoras con los diferentes protectores de AudioMoth respecto a índices acústicos tradicionales en el sitio UNED. PLS = Bolsa de plástico, TEF = Termoformadora, RES = Resina y TPU = TPU95A, donde (A): Índice de bioacústica, (B): Índice de diversidad acústica, (C): Índice de diferencia normalizada del paisaje sonoro y (D): Índice de Picos.

Respecto al sitio Heredia, también se encontraron diferencias significativas entre los prototipos evaluados (figura 6) para el índice BIO (KW = 11,31; $p < 0,05$, gl = 99), ADI (KW = 69,03; $p < 0,05$, gl = 99), NDSI (KW = 77,24; $p < 0,05$, gl = 99) y no se encontraron diferencias en el índice NP (KW = 5,79; $p > 0,05$, gl = 99).

Al comparar entre los prototipos en el índice BIO, solo se presentaron diferencias significativas entre PLS y TEF, así como entre TEF y TPU, tal como se puede observar en la Figura 6. Finalmente, no se encontraron diferencias significativas en el índice de picos para ninguno de los protectores.

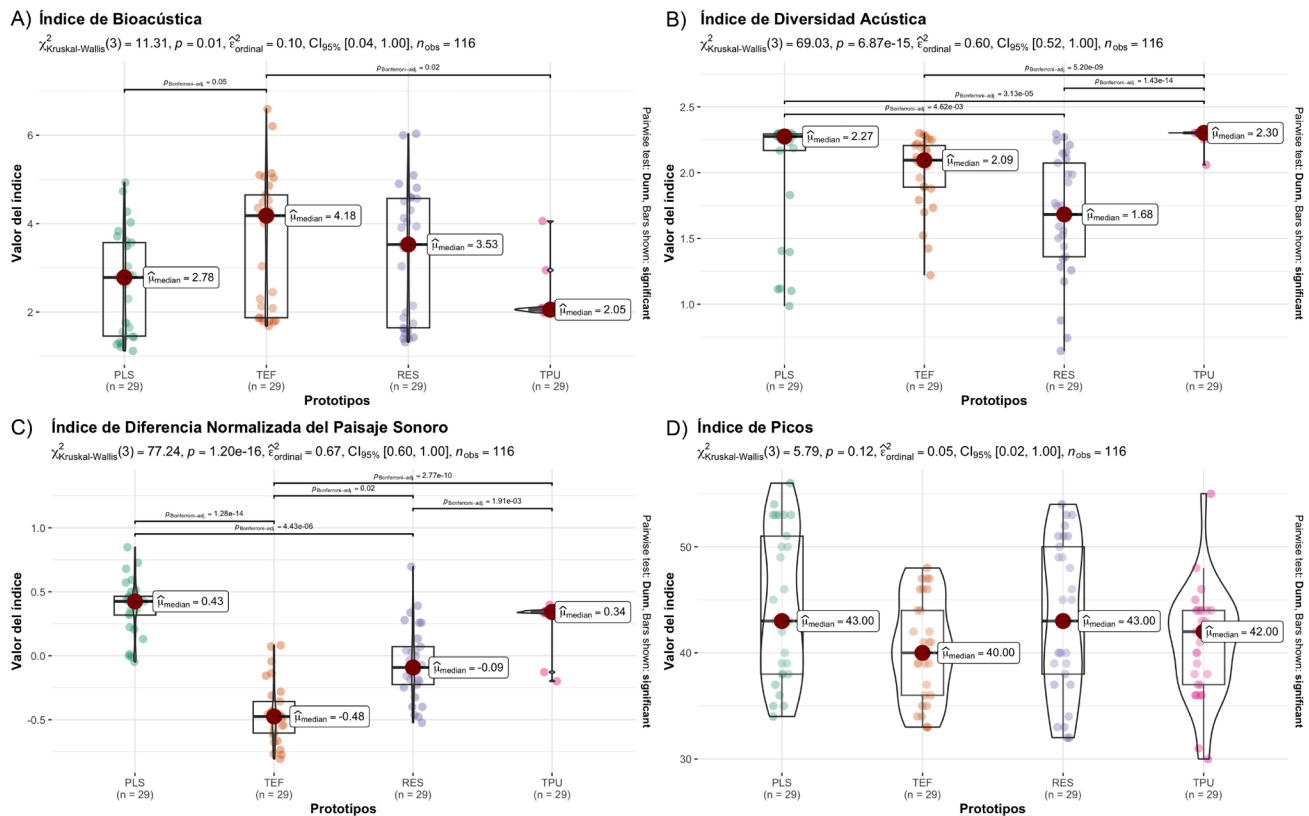


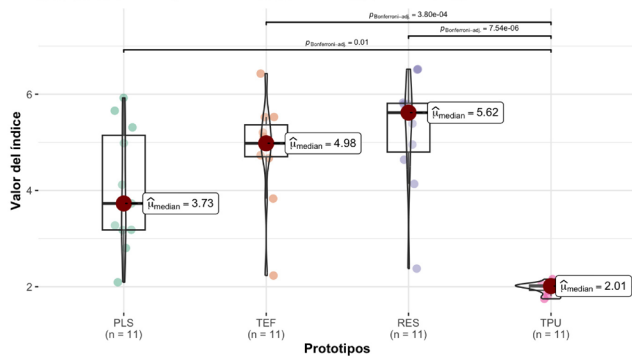
Fig. 6. Comparación del desempeño de las grabadoras con los diferentes protectores de AudioMoth respecto a índices acústicos tradicionales en el sitio Heredia. PLS = Bolsa de plástico, TEF = Termoformadora, RES = Resina y TPU = TPU95A, donde (A): Índice de bioacústica, (B): Índice de diversidad acústica, (C): Índice de diferencia normalizada del paisaje sonoro y (D): Índice de Picos.

Por último, en el sitio Guayabo, se encontraron diferencias significativas (figura 7) en el índice BIO (KW = 26,86; $p < 0,05$, gl = 99), ADI (KW = 31,77; $p < 0,05$, gl = 99), NDSI (KW = 6,83; $p < 0,05$, gl = 99) y tampoco se encontraron diferencias en el indicador NP (KW = 3,12; $p > 0,05$, gl = 99) para los prototipos evaluados.

En la Figura 7, se observa que la referencia con bolsa de plástico no presentó diferencias con los prototipos para el indicador ADI. En general, no se presentaron diferencias entre los prototipos y la bolsa de plástico de manera generalizada para el indicador NDSI y NP.

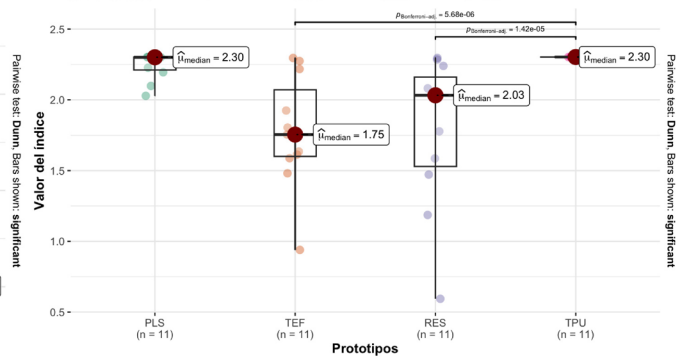
A) Índice de Bioacústica

$\chi^2_{Kruskal-Wallis}(3) = 26.86, p = 6.31e-06, \hat{\epsilon}^2_{ordinal} = 0.62, CI_{95\%} [0.57, 1.00], n_{obs} = 44$



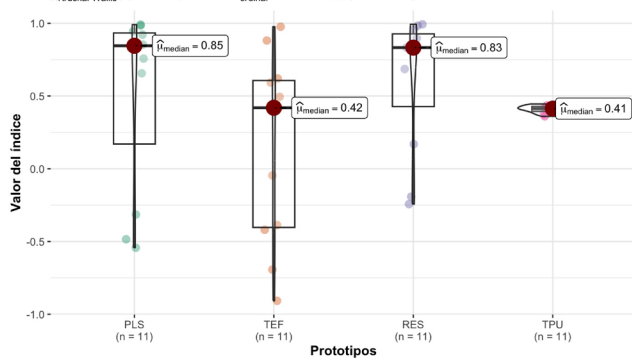
B) Índice de Diversidad Acústica

$\chi^2_{Kruskal-Wallis}(3) = 31.77, p = 5.84e-07, \hat{\epsilon}^2_{ordinal} = 0.74, CI_{95\%} [0.69, 1.00], n_{obs} = 44$



C) Índice de Diferencia Normalizada del Paisaje Sonoro

$\chi^2_{Kruskal-Wallis}(3) = 6.83, p = 0.08, \hat{\epsilon}^2_{ordinal} = 0.16, CI_{95\%} [0.05, 1.00], n_{obs} = 44$



D) Índice de Picos

$\chi^2_{Kruskal-Wallis}(3) = 3.12, p = 0.37, \hat{\epsilon}^2_{ordinal} = 0.07, CI_{95\%} [6.86e-03, 1.00], n_{obs} = 44$

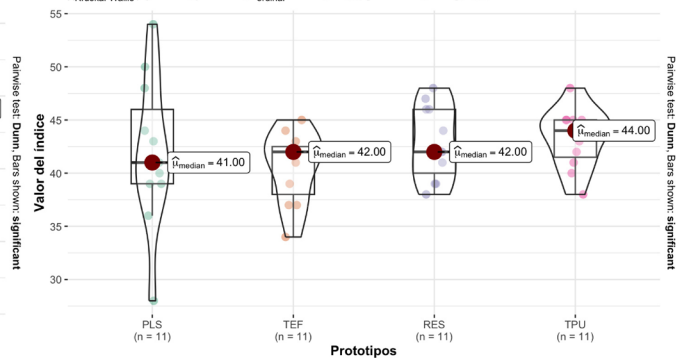


Fig. 7. Comparación del desempeño de las grabadoras con los diferentes protectores de AudioMoth respecto a índices acústicos tradicionales en el sitio Guayabo. PLS = Bolsa de plástico, TEF = Termoformadora, RES = Resina y TPU = TPU95A, donde (A): Índice de bioacústica, (B): Índice de diversidad acústica, (C): Índice de diferencia normalizada del paisaje sonoro y (D): Índice de Picos.

El prototipo que menor variación haya obtenido respecto a la referencia de la bolsa de plástico es el que puede considerarse como el prototipo que, en menor grado, modifica las variables ambientales a pesar del protector. Esto considerando las diferencias estadísticas en las pruebas por pares (Test de Dunn con corrección de Bonferroni).

Al comparar los resultados, se observa que el prototipo que presentó menores diferencias para cada uno de los índices acústicos respecto a los demás y, en especial, respecto a la referencia de la bolsa de plástico, fue el prototipo a base de resina (Protector 2).

Una vez realizadas las pruebas, se analizó de manera conjunta entre el diseñador y el experto en bioacústica, los materiales, las ventajas y las desventajas identificadas durante las pruebas de campo. Este análisis se resume en la Tabla II.

TABLA II

ANÁLISIS DE LOS MATERIALES, VENTAJAS Y DESVENTAJAS IDENTIFICADAS DURANTE LAS PRUEBAS POR PARTE DEL INVESTIGADOR EN BIOACÚSTICA.

| Protector | Código | Ventajas | Desventajas |
|----------------------|--------|---|--|
| Bolsa plástica | PLS | Pocas ventajas. Facilidad de uso y bajo costo. | Insectos y otros animales pueden destruir la bolsa. La bolsa tiende a destruirse rápido en condiciones húmedas y puede dañar los dispositivos de grabación. Necesita protección extra para evitar daños |
| Termoformadora Mayku | TEF | El material parece brindar una protección ante las condiciones ambientales, ya que se dificulta el paso o ingreso de fluidos (material utilizado para moldes). | La integridad de la grabadora puede verse comprometida por ciertos mamíferos, como las ardillas. La transparencia podría hacer evidentes las luces de la AudioMoth. El cierre hermético es complicado de colocar en campo. |
| Resina fotosensible | RES | Por la dureza del material, se podría brindar una mejor protección ante la abrasión por animales. Puede camuflarse con pintura u otro material dada su facilidad para recubrimiento, así como variedad de colores de resina. | El color original del material puede ser llamativo en ambientes naturales. |
| TPU95A | TPU | Puede brindar mejor protección dado el grosor del material comparado con materiales plásticos. | La protección ante ciertos animales puede no ser suficiente. La coloración de los laterales es muy llamativa, pero puede adaptarse. El sistema de cierre es difícil de quitar posterior a su colocación. |

A pesar de que todos los prototipos pueden ser funcionales respecto a los requerimientos y requisitos iniciales, el prototipo que mejor se ajusta a estas sugerencias iniciales es el prototipo de resina (RES). Una vez desarrolladas las pruebas y consideradas estas sugerencias, se desarrolló digitalmente un prototipo final que considera la realimentación facilitada por el experto en bioacústica (Figura 8).

En este prototipo final, se mejoró el mecanismo de cierre de la tapa inferior con una adaptación de su base para una mayor protección y aislamiento, se aumentó el número de orificios de entrada del sonido (que además estarán protegidos por el *sticker* adhesivo IP67) y se mejoró el borde del techo de protección del prototipo.

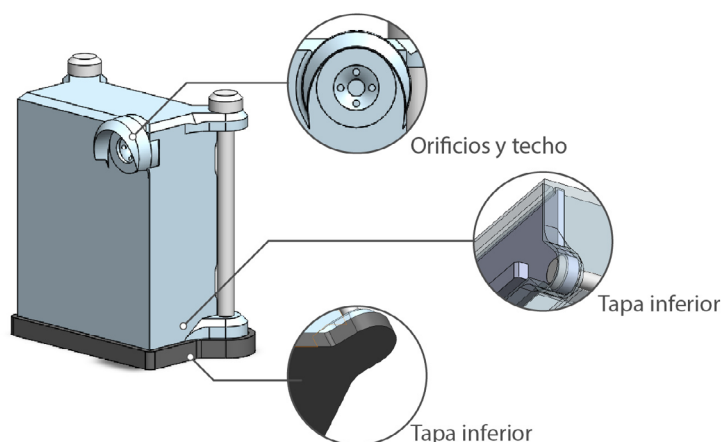


Fig. 8. Prototipo final desarrollado a partir de la retroalimentación adquirida en la investigación y uso de los distintos prototipos.

Discusión

Los requisitos y requerimientos que se establecen para el diseño del prototipo permiten visualizar la problemática desde distintas perspectivas. A partir de esta evaluación, fue posible el desarrollo de varios prototipos, con métodos de fabricación y materiales distintos que se adaptan a las condiciones de campo durante procesos de grabación. Esta flexibilidad adaptada a condiciones ambientales y situaciones particulares que favorecen su funcionalidad en cada proyecto de investigación y con ello generar innovación con el apoyo de metodologías como Design Thinking [17].

Se demuestra que, con las tecnologías disponibles en un Laboratorio de Fabricación, se pueden integrar aspectos de distintas perspectivas para generar modelos o prototipos en investigaciones con grandes ventajas constructivas como el aumento de la precisión, la reducción de tiempo de producción, el incremento de la calidad en los acabados, entre otras [18].

Entre los prototipos evaluados, el protector 2, fabricado a base de resina, puede adaptarse para uso en exteriores gracias a su facilidad de fabricación, durabilidad y alta calidad de acabado. La resina permite altos niveles de detalle, lo que la hace apropiada incluso para aplicaciones como carcasas de otros dispositivos electrónicos y modelos de uso final [19], por ejemplo, en estaciones meteorológicas o cámaras trampa, comunes también en proyectos ambientales.

En contraste, el desarrollo de los protectores 1 y 3 requiere una alta interacción manual de la persona usuaria durante su fabricación y esto puede causar resultados o interacciones no deseadas debido a algún error humano [20]. Esto contrasta con el prototipo de protector 2, donde se mejora su calidad al tener una menor interacción durante su fabricación (impresión 3D, por SLA).

La creación de protectores personalizados para las placas AudioMoth es indispensable para el desarrollo de investigaciones en el campo de bioacústica, a fin de garantizar la integridad de los dispositivos en campo. A pesar de que las empresas distribuidoras de estas grabadoras comercializan un protector, su alto costo, tiempos de envío y aspectos logísticos reducen las posibilidades para la implementación rápida en investigaciones en Costa Rica y la región.

Investigaciones recientes han evidenciado el efecto negativo de utilizar métodos tradicionales de protección como las bolsas plásticas y se han documentado las atenuaciones en las características espectrales con sutiles variaciones en frecuencias por debajo de 12 kHz, al comparar el método con bolsa de plástico de AudioMoth con grabaciones autónomas tradicionales [21].

Los resultados de las comparaciones acústicas muestran la variabilidad de los diferentes prototipos respecto a la manera tradicional de proteger las grabadoras. Las diferencias significativas encontradas entre los diferentes prototipos coinciden con las variaciones identificadas por otros autores [22] en evaluaciones del efecto de las bolsas plásticas en las características espectrales.

Para el análisis acústico, se utilizaron solo indicadores espectrales y no indicadores de presión sonora, ya que no se realizó una calibración de los valores de presión mediante medidores de presión acústica certificados, por lo que es mejor mantenerlo solo a nivel espectral según las recomendaciones de Buxton et al. [23].

Los indicadores BIO, ADI, NDSI y NP son ampliamente utilizados en estudios de paisaje sonoro. Estos son altamente sensibles a variables como el ruido ambiental y las características del ambiente, por lo que se recomienda que el sitio de grabación de referencia, o controlado sea un espacio con reducida reverberación para no afectar los resultados [24].

Según lo observado y recomendado por usuarios expertos, se identificaron oportunidades de mejora para el diseño del prototipo 2, tales como aumentar el número y diámetro de los orificios de entrada de sonido, integrar un sello con material en TPU 95A (similar al del protector 1) para reforzar la protección ante condiciones climáticas y extender el techo de la entrada sin comprometer la capacidad de grabación dado el patrón polar del micrófono omnidireccional.

Conclusiones

El estudio demuestra que es posible desarrollar prototipos funcionales y eficientes para la protección de grabadoras AudioMoth utilizando tecnologías accesibles. Esto permite disminuir la complejidad ante aspectos logísticos y económicos en contextos como el costarricense, donde el acceso a productos especializados puede ser limitado.

El protector 2, fabricado en resina, se muestra como una opción viable para uso en exteriores, gracias a su resistencia, calidad de acabado y facilidad de fabricación. Su diseño minimiza la intervención humana, reduciendo errores y mejorando la producción de los dispositivos.

Las evaluaciones de los dispositivos desarrollados son de suma importancia, ya que no es suficiente con que los protectores cumplan con su función de escudo ante las condiciones climáticas, también es necesario asegurar que no se afecte la calidad acústica, tanto a nivel espectral como de intensidad sonora. También se propone realizar pruebas acústicas específicas para garantizar la validez de los datos en estudios de paisaje sonoro en investigaciones relacionadas a temas ambientales donde se evalúe el efecto del tipo de estuche protector.

Se destaca la necesidad de continuar evaluando prototipos en comparación con los estuches oficiales de AudioMoth, lo cual no fue posible en esta investigación. Estas comparaciones permitirán establecer estándares de referencia más sólidos y mantener una calidad comparable con los estándares brindados por la empresa desarrolladora de las grabadoras.

Por último, se recomienda que futuros desarrollos consideren no solo criterios de protección estructural, sino también el impacto acústico del diseño, aplicando metodologías de validación que integren tanto pruebas espectrales como indicadores de presión sonora calibrados. Esto asegurará una adopción más robusta y confiable en contextos científicos exigentes.

Agradecimientos

Agradecemos a Ana María Sandoval por sus sugerencias y revisiones en el manuscrito. Se agradece el apoyo técnico y financiamiento para materiales e insumos de la investigación a la Vicerrectoría de Investigación desde el Laboratorio de Fabricación Kå Träre y el Laboratorio de Investigación e Innovación Tecnológica de la Universidad Estatal a Distancia.

Referencias

- [1] . T. Blumstein, D. J. Mennill, P. Clemins, L. Girod, K. Yao, G. Patricelli, J. L. Deppe, A. H. Krakauer, C. Clark, K. A. Cortopassi, S. F. Hanser, B. McCowan, A. M. Ali, y A. N. G. Kirschel, "Acoustic monitoring in terrestrial environments using microphone arrays: applications, technological considerations and prospectus", *Journal of Applied Ecology*, vol. 48, no. 3, pp. 758-767, 2011, Consultado: 2 jun, 2024. doi: 10.1111/j.1365-2664.2011.01993.x [En línea] Disponible: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2664.2011.01993.x>.
- [2] A. P. Hill, P. Prince, J. L. Snaddon, C. P. Doncaster, y A. Rogers, "AudioMoth: A low-cost acoustic device for monitoring biodiversity and the environment", *HardwareX*, vol. 6, p.p e00073, 2019, Consultado: 26 may, 2024. doi: 10.1016/j.ohx.2019.e00073 [En línea] Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468067219300306>.

- [3] A. P. Hill, P. Prince, E. P. Covarrubias, C. P. Doncaster, J. L. Snaddon, y A. Rogers, "AudioMoth: Evaluation of a smart open acoustic device for monitoring biodiversity and the environment", *Methods in Ecology and Evolution*, vol. 9, no. 5, pp. 1199-1211, 2018, Consultado: 2 jun, 2024. doi: 10.1111/2041-210X.12955 [En línea] Disponible: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/2041-210X.12955>.
- [4] Fab Foundation, "fablabs.io", 2017 Consultado: 4 jun, 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.fablabs.io/>.
- [5] C. Vetterli, W. Brenner, F. Uebernickel, y C. Petrie, "From palaces to yurts: Why requirements engineering needs design thinking", *IEEE Internet Computing*, vol. 17, no. 2, pp. 91-94, 2013, Consultado: 28 may, 2024. doi: 10.1109/MIC.2013.32 [En línea] Disponible: <https://www.computer.org/csdl/magazine/ic/2013/02/mic2013020091/13rUJJuxzG>.
- [6] M. A. Pinilla, "Dar sentido a las posibilidades: síntesis y prototipo en diseño", *Iconofacto*, vol. 10, no. 15, pp. 22-34, 2014, Consultado: 1 jun, 2024. doi: 20.500.11912/7416 [En línea] Disponible: <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/7416>.
- [7] Mayku, "Clear sheets", 2024. Consultado: 21 jun, 2024. [En línea] Disponible: <https://mayku.me/materials/clear-sheets>.
- [8] Formlabs, "Polvos y resinas para impresión 3D", 2024. Consultado: 21 jun, 2024. [En línea]. Disponible: https://formlabs.com/latam/materials/?print_technology%5B0%5D=SLA&color%5B0%5D=grey.
- [9] UltiMaker, "S series TPU 95A", 2024, Consultado: 11 May, 2024. [En línea]. Disponible: <https://ultimaker.com/materials/s-series-tpu-95a/>.
- [10] Acrílicos, "Acrílicos S.A ", 2024, Consultado: 15 May, 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.acrilicos.com/producto/acrilicos/>.
- [11] D. Alfaro-Rojas, I. Portugués-Brenes, H. Perdomo-Velázquez, and R. Vargas-Masís, "Ruido ambiental en áreas verdes urbanas y periurbanas de una microcuenca en Heredia, Costa Rica", *UNED Cuadernos de Investigación*, vol. 12, no. 2, pp. e2846-e2846, 2020. Consultado: 2 jun, 2024. doi: 10.22458/urj.v12i2.2846 [En línea] Disponible: https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1659-42662020000200419&lng=en&nrm=iso&tlng=es.
- [12] J. Castro, R. Vargas-Masís, and D. Alfaro-Rojas, "Deep Multiple Instance Learning Ensemble for the Acoustic Detection of Tropical Birds", In *19th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA)*, pp. 264-269, 2020. Consultado: 4 jun, 2024. doi: 10.1109/ICMLA51294.2020.00051 [En línea] Disponible: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9356393>
- [13] O. Ramírez-Alán, "Sinax: Sound Index Analysis for Ecologist (versión 1.3)", R package, version 1.3, 2019. Consultado: 2 may, 2024 [En línea]. Disponible: <https://rdr.io/github/osoramirez/Sinax/>.

- [14] P. Mair and R. Wilcox, "Robust statistical methods in R using the WRS2 package", *Behavior Research Methods*, vol. 52, no. 2, pp. 464–488, 2020. Consultado: 4 jun, 2024. doi: 10.3758/s13428-019-01246-w [En línea] Disponible: <https://link.springer.com/article/10.3758/s13428-019-01246-w>.
- [15] E. Ramalle-Gómara and J. Andrés de Llano, "Utilización de métodos robustos en la estadística inferencial", *Atención Primaria*, vol. 32, no. 3, pp. 177–182, 2003. Consultado: 2 jun, 2024. doi: 10.1016/S0212-6567(03)79241-5 [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0212656703792415>.
- [16] R Core Team, "R: A language and environment for statistical computing," R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2020. Consultado: 24 may, 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.R-project.org/>.
- [17] L. Liu and B. C. Lin, "Influences of three-dimensional printing to product innovation design thinking", in *Design, Manufacturing and Mechatronics: Proceedings of the International Conference on Design, Manufacturing and Mechatronics (ICDMM2016)*, pp. 107-112, 2017. Consultado: 22 may, 2024. doi: 10.1051/mateconf/201710003032 [En línea]. Disponible: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2017/14/mateconf_gcmm2017_03032/mateconf_gcmm2017_03032.html.
- [18] D. T. Díaz, "Tecnologías de Fabricación Digital Aditiva, ventajas para la construcción de modelos, prototipos y series cortas en el proceso de diseño de productos", *Iconofacto*, pp. 118-143, 2016. Consultado: 22 may, 2024. doi: 10.18566/v12n18.a07 [En línea]. Disponible: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6302021>.
- [19] M. R. Pérez Sevilla, "Manual de Impresión 3D Resina", Universidad de Burgos, DINPER, 2024. Consultado: 20 jun, 2024. [En línea]. Disponible: https://riubu.ubu.es/bitstream/handle/10259/9171/Perez-Manual_impresion_3D_resina_2024.pdf;jsessionid=DB2EDD87056C305328BF7C7D29E9920F?sequence=1.
- [20] Y. Torres-Medina, "El análisis del error humano en la manufactura: un elemento clave para mejorar la calidad de la producción," *Revista UIS Ingenierías*, vol. 19, no. 4, pp. 53-62, 2020. Consultado: 22 jun, 2024. doi: 10.18273/revuin.v19n4-2020005 [En línea]. Disponible: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9514503>.
- [21] P. E. Osborne, T. Alvares-Sanches, and P. R. White, "To bag or not to bag? How AudioMoth-based passive acoustic monitoring is impacted by protective coverings", *Sensors*, vol. 23, no. 16, p. 7287, 2023. Consultado: 22 may, 2024. doi: 10.3390/s23167287 [En línea]. Disponible: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/16/7287#:~:text=While%20bare%20board%20AudioMoth%20showed,uncertainty%2C%20rendering%20index%20comparisons%20unreliable>.
- [22] D. J. Mennill, M. Battiston, D. R. Wilson, J. R. Foote, y S. M. Doucet, "Field test of an affordable, portable, wireless microphone array for spatial monitoring of animal ecology and behaviour", *Methods in Ecology and Evolution*, vol. 3, no. 4, pp. 704-712, 2012. Consultado: 17 jun, 2024. doi: 10.1111/j.2041-210X.2012.00209.x [En línea]. Disponible: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.2041-210X.2012.00209.x>.

- [23] R. T. Buxton, M. F. McKenna, M. Clapp, E. Meyer, E. Stabenau, L. M. Angeloni, K. Crooks, y G. Wittemyer, "Efficacy of extracting indices from large-scale acoustic recordings to monitor biodiversity", *Conservation Biology*, vol. 32, no. 5, pp. 1174-1184, 2018. Consultado: 15 may, 2024. doi: 10.1111/cobi.13119 [En línea]. Disponible: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/cobi.13119>.
- [24] T. Bradfer-Lawrence, N. Gardner, L. Bunnefeld, N. Bunnefeld, S. G. Willis, y D. H. Dent, "Guidelines for the use of acoustic indices in environmental research", *Methods in Ecology and Evolution*, vol. 10, no. 10, pp. 1796-1807, 2019. Consultado: 10 jun, 2024. doi: 10.1111/2041-210X.13254 [En línea]. Disponible: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/2041-210X.13254>.