

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**

**Instituto de Investigaciones Oceanológicas**

**Facultad de Ciencias**

**Facultad de Ciencias Marinas**



**AVIFAUNA E INCENDIOS FORESTALES EN BOSQUES TEMPLADOS: APORTES PARA  
LA CONSERVACIÓN Y EL MANEJO INTEGRAL POST-INCENDIO EN LA SIERRA DE SAN  
PEDRO MÁRTIR.**

**TESIS**

**que para obtener el grado de:**

**DOCTORA EN MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO**

Presenta:

**Diana Ramírez Sánchez**

Director:

**Dr. Hiram Rivera Huerta**

Ensenada, Baja California

Agosto, 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS  
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

**“AVIFAUNA E INCENDIOS FORESTALES EN BOSQUES TEMPLADOS: APORTES  
PARA LA CONSERVACIÓN Y EL MANEJO INTEGRAL POST-INCENDIO.”**

Tesis que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

**Doctora en Medio Ambiente y Desarrollo**

Presenta

**Diana Ramírez Sánchez**

Aprobada por:



**Dr. Hiram Rivera Huerta**

Director



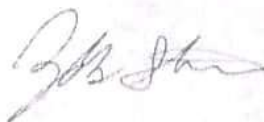
**Dr. Gonzalo de León Girón**

Sinodal



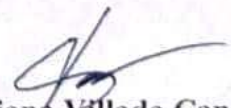
**Dr. Georges Seingier**

Sinodal



**Dr. Zachary Steel**

Sinodal



**Dra. Mariana Villada Canela**

Sinodal

## RESUMEN

El fuego es un agente ecológico clave en los bosques de coníferas, afectando su estructura y diversidad biológica. Esta tesis analiza su papel en la riqueza de aves del Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir (PNSSPM), México, con el fin de proponer lineamientos para el monitoreo y manejo adaptativo post-incendio. En el Capítulo I, se realizó una revisión sistemática de 52 estudios publicados entre 2000 y 2022, con el objetivo de identificar tendencias, vacíos de conocimiento y enfoques metodológicos predominantes en la investigación sobre fuego y avifauna en bosques templados. Esta síntesis bibliométrica evidenció un creciente interés en el uso de aves como bioindicadores ecológicos, así como un cambio en las percepciones sobre el papel ecológico del fuego, reconociendo su importancia para la funcionalidad de ecosistemas adaptados a este disturbio. Sin embargo, también reveló una notable heterogeneidad en los enfoques metodológicos: aproximadamente el 50% de los estudios no incluyeron niveles de severidad del fuego, el 38% no consideró áreas de control o datos previos a la perturbación, y solo el 60% utilizó modelos estadísticos en sus análisis. Estos resultados indican la necesidad de estandarizar las metodologías, incorporar gradientes de severidad y utilizar sitios de referencia no perturbados, especialmente cuando los resultados se destinan a fundamentar decisiones de manejo o conservación. Asimismo, se destaca la importancia de incluir variables como la estacionalidad del muestreo y el historial de fuego, a fin de mejorar la comprensión de las respuestas de las comunidades aviares ante los incendios forestales. El Capítulo II presenta un estudio de caso en el PNSSPM, veinte años después de un incendio ocurrido en 2003. Se evaluó la riqueza de especies de aves mediante monitoreo acústico pasivo en ocho sitios distribuidos en cuatro niveles de severidad (muy alta, alta, media-baja y bosque sin quemar), a lo largo de las cuatro estaciones del año. El análisis estadístico, mediante un modelo lineal generalizado con distribución binomial negativa, mostró que tanto la severidad del incendio como la estación, y especialmente su interacción, influyen significativamente en la riqueza de aves. Se encontró que las áreas de severidad alta presentaron un aumento del 61% en riqueza promedio respecto al bosque no quemado en invierno (base de 10.13 especies), mientras que la severidad muy alta mostró un aumento del 26%, y la severidad media-baja una reducción del 23%. La riqueza aumentó notablemente en primavera, con incrementos de hasta el 121% en sitios de severidad alta, y un 57% en verano para el bosque. Estos resultados respaldan la hipótesis de que ciertos niveles de perturbación, junto con la estacionalidad, pueden promover la biodiversidad aviar a largo plazo. En el Capítulo III, se propone una guía técnica para el monitoreo acústico de aves en zonas post-incendio, diseñada en colaboración con personal del área protegida. Esta

guía incluye criterios para la selección de sitios, protocolos de grabación, análisis bioacústico y recomendaciones estadísticas, buscando facilitar la integración de las aves como bioindicadores en los programas de manejo integral del fuego. En conjunto, esta tesis ofrece una visión integrada del fuego como proceso ecológico, promueve el uso de herramientas de monitoreo acústico y aporta estrategias concretas para la conservación de la biodiversidad en contextos de perturbación natural. Además, propone lineamientos replicables para otros ecosistemas mediterráneos afectados por incendios, en un contexto de cambio climático y creciente presión sobre los recursos naturales.

**Palabras clave:** Ecología del fuego, bosques de coníferas, incendios forestales, riqueza de aves, avifauna, severidad, monitoreo acústico, manejo integral del fuego, Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la UABC y al Instituto de Investigaciones Oceanológicas.

A la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECHITI) por otorgarme la beca con la que realicé mis estudios de doctorado.

Al Comité Evaluador que acompañó este proceso: Dr. Hiram Rivera Huerta (Director), Dr. Gonzalo de León Girón, Dr. Georges Seingier, Dra. Mariana Villada Canela y Dr. Zachary Steel (sinodales). Su participación y observaciones, aunque desafiantes, contribuyeron a fortalecer este trabajo y a consolidar el camino recorrido.

Extiendo mi reconocimiento al equipo del Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir, especialmente a mis queridos guardaparques Juan y Chuy, quienes han mostrado durante años una generosa disposición para apoyar los procesos de investigación en el área. Y su apoyo a mis ideas entusiastas.

A la directora M.C Verónica C. Meza López, por su respaldo institucional, su paciencia y por abrirnos las puertas del parque para llevar a cabo este estudio.

A la administración de los parques nacionales Sierra de San Pedro Mártir y Constitución de 1857 y al Dr. Ricardo Eaton por el préstamo en especie de grabadoras acústicas.

A Baja Working group por el apoyo económico a través del proyecto para la adquisición equipo.

Agradezco con aprecio a todos los jóvenes del servicio profesional, quienes dedicaron incontables horas al vaciado de datos con compromiso, precisión y paciencia.

Al Dr. Alejandro García Gastelum por el apoyo con una beca completaría a través del proyecto Atlas de Riesgo de Tecate.

Al proyecto de convocatoria interna UABC, “Establecimiento de un banco de germoplasma para el resguardo del patrimonio cultural y biológico de la región mediterránea en Baja California, ante escenarios del cambio climático e incendios forestales frecuentes” (55563-II-C1A6 HRivera).

Durante los desafíos computacionales que implicaron transformar y analizar grandes volúmenes de datos, encontré valiosa guía y consuelo en las comunidades digitales y blogs de R, espacios colaborativos donde programadores y científicos compartieron generosamente soluciones para estructurar y modelar data frames complejos. Su ayuda remota fue esencial y profundamente agradecida.

A mis valientes colegas de campo, Enrique Rebelin, Leroy y Tonatiuh, gracias por su entrega, entusiasmo y disposición para incursionar conmigo entre laderas escarpadas, lomas y cañadas de este bosque indómito, incluso cuando el cansancio y el terreno nos pusieron a prueba. Su compañía no solo fue un soporte logístico, sino también una fuente de buena compañía.

A Isabel Raymundo y Enrique Zamora, por su valiosa aportación audiovisual y su reconocimiento al trabajo realizado.

Agradezco también las charlas creativas —algunas reales y muchas virtuales— que surgieron en el camino con personas que, desde distintos rincones y saberes, me ayudaron a atravesar la complejidad de la codificación, el modelado estadístico y la representación visual de los datos.

A mi cómplice, el Fer, por su mirada optimista siempre viendo hacia lo posible; lo que me impulsó a dar estos pasos con fuerza a pesar de tener en contra mi condición física. Gracias por impulsarme a avanzar con fuerza, aún en medio de las complejidades.

A quienes coincidieron conmigo en talleres, muestreos, charlas, exposiciones o simplemente se acercaron con una palabra de aliento —aunque no conocieran el trasfondo—, gracias infinitas. Su gesto fue más significativo de lo que imaginan.

Sin cada uno de ustedes, esta tesis no existiría .

*Cheers.*

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN GENERAL.....	7
Introducción.....	7
Objetivos.....	10
<i>General</i> .....	10
<i>Particulares</i> .....	10
Justificación.....	11
Metodología General.....	13
Bibliografía.....	16
CAPÍTULO I.....	19
CAPÍTULO II.....	36
Introducción.....	37
Área de estudio.....	41
Objetivos.....	45
<i>General</i> .....	45
<i>Particulares</i> .....	45
Metodología.....	46
Análisis de Datos.....	51
Resultados.....	55
Discusión.....	66
Conclusiones.....	69
Limitaciones y perspectivas de análisis futuro.....	70
Bibliografía.....	71
Anexos.....	76
CAPÍTULO III.....	81
Alcance y adaptabilidad.....	82
Introducción.....	83
Objetivos.....	84
<i>General</i> .....	84
<i>Particulares</i> .....	84
Metodología de Evaluación.....	85
Resultados Esperados.....	102
Bibliografía.....	109
CONCLUSIÓN GENERAL.....	116
RECOMENDACIONES FINALES.....	117

## ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

### CAPÍTULO I: A Systematic Review of Trends and Methodologies in Research on the Effects of Wildfires on the Avifauna in Temperate Forests

<b>Figura 1:</b> Map of collaborations among countries in research on the impacts of forest fires on temperate forests, employing birds as indicators. Grayscale intensity indicates the number of publications produced in each country.....	24
<b>Figura 2:</b> Authors with the highest productivity from 2000 to 2022. The black lines depict the publication timeline. The circles represent published documents, with large circles indicating two documents and small circles one document. TCPY: total citations per year.....	25
<b>Figura 3:</b> Thematic keyword map. Larger circle sizes indicate a greater co-occurrence of words connected to the main word node.....	27

### CAPÍTULO II: Los Incendios Forestales: ¿Promotores de la Biodiversidad? Un Estudio de Caso en el Parque Nacional "Sierra de San Pedro Mártir"

<b>Figura 1.</b> Perímetro de incendio del 2003 dentro del Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir en Baja California, México. Elaboración propia con base en datos de CONANP (2024).....	41
<b>Figura 2.</b> Panorámica del paisaje en la zona norte del Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir, área afectada por un incendio forestal en julio de 2003.....	43
<b>Figura 3.</b> Sector norte del Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir que muestran el perímetro de la cicatriz del incendio, las categorías de severidad utilizadas para el diseño del muestreo, y la localización de los ocho sitios seleccionados en este estudio.....	47
<b>Figura 4.</b> Grabadoras acústicas autónomas utilizadas para la recolección de datos de campo. (a) <i>Song Meter Mini 2</i> y (b) <i>Song Meter SM3</i> , ambos modelos de la marca <i>Wildlife Acoustics</i> .....	50
<b>Figura 5.</b> Distribución de la riqueza de especies según la severidad del fuego.....	55
<b>Figura 6.</b> Variación estacional de la riqueza promedio de especies de aves según la severidad del fuego en el PNSSPM.....	56
<b>Figura 7.</b> Gráfico cuantil-cuantil (QQ plot) del MLGbn. Los residuos se desvían significativamente de la	

distribución teórica (Kolmogorov–Smirnov, $p < 0.05$ ).....	57
<b>Figura 8.</b> Histograma de residuos estandarizados del MLGbn. Se detectaron valores atípicos (en rojo).....	58
<b>Figura 9.</b> Análisis de contraste o cambios porcentuales en la riqueza de aves entre estaciones dentro de cada categoría de severidad del fuego, estimados a partir del MLGbn.....	63
<b>Tabla I.</b> Clases de severidad del fuego según el cambio porcentual en área basal (BA) de árboles vivos, con valores aproximados de RdNBR, basadas en Rivera-Huerta (2016) y Miller et al. (2009b).....	45
<b>Tabla II.</b> Imágenes representativas del paisaje en cada categoría de severidad del fuego, que ilustran diferencias en composición, cobertura y estructura vegetal observadas en campo.....	49
<b>Tabla III.</b> Coeficientes exponenciados ( $\exp(\text{Coef})$ ) del MLGbn que evalúa los efectos de severidad, estación e interacción sobre la riqueza de aves. Los valores representan cambios relativos respecto al bosque en invierno (intercepto). La columna de significancia indica: $p < 0.05$ (), $p < 0.01$ (), $p < 0.001$ ().....	59
<b>Tabla IV.</b> Resultados del análisis de contrastes que comparan la riqueza de especies de aves entre estaciones del año dentro de cada categoría de severidad del fuego. Se presentan los estimados logarítmicos, sus exponentes, el cambio porcentual relativo y una breve interpretación del cambio para cada comparación estacional.....	61

**CAPÍTULO III: Guía para el Monitoreo de Aves en Áreas Post-Incendio: Herramientas para un Manejo Integral del Fuego**

<b>Figura 1.</b> Diagrama de flujo con las etapas clave del protocolo para monitoreo acústico post-incendio. *POE: Protocolo Operativo Estandarizado.....	86
<b>Tabla I.</b> Lista de materiales, equipo y software recomendados para el trabajo de campo y análisis acústico post-incendio.....	97
<b>Tabla II.</b> Bibliografía propuesta en manejo de fuego por categorías.....	104

## **ESTRUCTURA DE LA TESIS.**

Esta tesis se compone de tres capítulos interrelacionados que abordan la relación entre los incendios forestales y las comunidades de aves, con el propósito de aportar al manejo adaptativo del fuego y a la conservación de la biodiversidad. A través de un enfoque integral, se busca no solo generar conocimiento ecológico, sino también proponer herramientas prácticas para el monitoreo post-incendio. La estructura de la tesis refleja una intención aplicada: contribuir al diseño de estrategias de conservación que reconozcan el papel ecológico del fuego y el valor de las aves como bioindicadores clave en la evaluación de ecosistemas afectados.

**Introducción general.** La introducción presenta el contexto ecológico y social en el que se inserta esta investigación, destacando la importancia de comprender la interacción entre el fuego y las comunidades de aves en ecosistemas forestales. También plantea el problema de investigación, los objetivos generales y específicos, así como la justificación del estudio, enfatizando su relevancia para el manejo adaptativo del fuego y la conservación de la biodiversidad.

**Capítulo I. Revisión sistemática de las tendencias y metodologías en la investigación sobre los efectos de los incendios forestales en la avifauna en bosques templados.** Este capítulo ofrece una revisión sistemática de la literatura científica sobre incendios forestales y comunidades de aves, con el objetivo de identificar tendencias, vacíos de conocimiento y enfoques metodológicos recurrentes. Se analizan palabras clave, autores clave, redes institucionales y temas emergentes, proporcionando un marco de referencia para contextualizar los capítulos posteriores.

**Capítulo II. ¿Los Incendios Forestales: Promotores de la Biodiversidad? Un Estudio de Caso en el Parque Nacional "Sierra de San Pedro Mártir".** En este capítulo se evalúa la riqueza y diversidad de aves en relación con tres grados de severidad del incendio en un bosque de coníferas del Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir. El análisis considera los gremios alimenticios y los tipos de nidificación, con el fin de comprender los efectos ecológicos del fuego a largo plazo sobre la avifauna.

**Capítulo III. Guía para el Monitoreo de Aves en Áreas Post-Incendio: Herramientas para un Manejo Integral del Fuego.** El presente capítulo introduce una guía práctica diseñada para apoyar el seguimiento y monitoreo ecológico de áreas afectadas por incendios, fundamentada en el estudio de las comunidades de aves como indicadores clave de la recuperación ecosistémica. Esta herramienta responde a la necesidad de contar con protocolos estandarizados y efectivos que faciliten la recolección y análisis de datos, permitiendo así una evaluación continua y adaptativa de los efectos del fuego sobre la biodiversidad.

La guía contempla criterios claros para la selección de sitios de muestreo según el gradiente de severidad del incendio, describe detalladamente los métodos recomendados para el censo acústico y visual de aves, y establece pautas para el procesamiento estadístico de los datos. Su finalidad es proveer a gestores y científicos de un marco operativo que contribuya a la toma de decisiones informadas en la conservación y manejo adaptativo de los ecosistemas post-incendio. Esta publicación-resultado surge del análisis riguroso y experiencia adquirida durante la investigación en el Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir, y se plantea como un recurso replicable para otros ecosistemas con dinámica de fuego similar.

**Conclusiones generales y recomendaciones.** Las conclusiones generales integran los hallazgos de los tres capítulos y discuten su contribución conjunta al conocimiento sobre la relación entre incendios y avifauna. Asimismo, se presentan recomendaciones para la investigación futura, el monitoreo post-incendio y la gestión de áreas naturales protegidas, con un enfoque en la aplicación práctica de los resultados obtenidos.

## INTRODUCCIÓN GENERAL

### Introducción

Durante milenios, el fuego ha ejercido una presión selectiva que ha dado lugar a adaptaciones morfológicas, fisiológicas y conductuales en plantas y animales, que dependen en distintos grados de su régimen natural (Kozlowski & Ahlgren, 1974; Glikson, 2013; He *et al.*, 2019). Sin embargo, las alteraciones antropogénicas de este régimen —ya sea por aprovechamiento, supresión prolongada o por incendios más intensos y frecuentes, derivados del cambio climático o provocados— han comenzado a modificar este delicado equilibrio ecológico (Pyke *et al.*, 2010).

Los bosques de coníferas representan algunos de los ecosistemas más extensos y dinámicos del hemisferio norte, donde las interacciones con el fuego moldean no solo su estructura y regeneración, sino también la diversidad biológica que albergan (Wright & Heinzelman, 2014). En la península de Baja California, estos bosques montanos, caracterizados principalmente por pino y encino, constituyen enclaves vitales de biodiversidad en un contexto regional predominantemente árido y semiárido (Sánchez *et al.*, 2013).

En esta región, los incendios forestales han sido parte integral del ciclo ecológico histórico, aunque la frecuencia y severidad han variado debido a cambios climáticos y actividades humanas (Rivera-Huerta *et al.*, 2016). Los incendios actúan como agentes naturales de renovación al eliminar el exceso de combustible, estimular la germinación de especies adaptadas y modificar la estructura del dosel, lo que repercute en la heterogeneidad del hábitat (Kelly & Brotons, 2017; Beverly *et al.*, 2020). Sin embargo, en los últimos decenios, la intensidad y extensión de los incendios han mostrado tendencias fluctuantes, vinculadas a episodios de sequía más severa y manejo forestal variable, que impactan de manera diferenciada en la resiliencia de estos ecosistemas (Stephens *et al.*, 2008; Levine *et al.*, 2016).

El Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir (PNSSPM) es uno de los bastiones más importantes de estos bosques en Baja California. Su ubicación, altitud y condiciones climáticas hacen de este parque un área clave para el estudio de la dinámica post-incendio y la conservación de especies endémicas y migratorias (CONANP, 2019). El incendio histórico de 2003, que afectó

diversas áreas con distintos niveles de severidad, ha servido como un caso emblemático para analizar los efectos a largo plazo de perturbaciones de fuego en la estructura y composición de las comunidades vegetales y faunísticas.

La severidad del incendio, entendida como el grado de daño provocado sobre la vegetación y la estructura del bosque, es un factor determinante en la respuesta ecosistémica. En el PNSSPM, se han identificado categorías que van desde no quemado hasta severidad muy alta, cada una con impactos diferenciados sobre la regeneración y disponibilidad de hábitats para la fauna (Rivera-Huerta *et al.*, 2016). Estas variaciones generan un mosaico espacial que influye directamente en la heterogeneidad y, por ende, en la biodiversidad, haciendo indispensable un análisis detallado y contextualizado para el manejo y restauración post-incendio.

Dentro de este contexto, las comunidades de aves se destacan como uno de los grupos biológicos más sensibles y reveladores de los cambios en el paisaje. Las aves responden de manera diversa a las perturbaciones causadas por los incendios, lo que las convierte en bioindicadores clave del estado y la dinámica ecológica post-fuego (Hutto *et al.*, 2008). Estas respuestas diferenciadas permiten identificar patrones de resiliencia ecológica, ya que mientras algunas especies prosperan y se benefician de las condiciones creadas por el disturbio, otras disminuyen su presencia o tardan en recolonizar los hábitats afectados (Stephens *et al.*, 2019). Por ejemplo, especies como el Carpintero de espalda negra (*Black-backed Woodpecker - Picoides arcticus*) proliferan en áreas recientemente quemadas debido a la abundancia de insectos en la madera muerta (Nappi & Drapeau, 2009; Siegel *et al.*, 2016), mientras que otras, como el Zorzal ermitaño (*Hermit Thrush - Catharus guttatus*), tienden a desaparecer en los primeros años posteriores al disturbio (Hargrove & Unitt, 2018).

Frente a estos cambios, surge la necesidad de contar con herramientas de monitoreo ecológico, especialmente métodos bioacústicos, que permitan evaluar la recuperación del ecosistema y su resiliencia funcional a través del seguimiento de las comunidades de aves. Comprender estas respuestas no solo enriquece nuestro conocimiento ecológico, sino que se vuelve esencial para diseñar estrategias de conservación y manejo adaptativo que integren al fuego como un proceso ecológico legítimo, en lugar de considerarlo exclusivamente como una

amenaza. Con ello, se busca responder: ¿Cómo influye la severidad del fuego y la estacionalidad en la riqueza de aves en un bosque templado post-incendio?

Para ello, se plantearon tres objetivos: i) sintetizar tendencias globales sobre fuego y avifauna; ii) analizar empíricamente los efectos de severidad y estacionalidad en la riqueza de aves; y iii) proponer un protocolo técnico para el monitoreo post-incendio. En el primer capítulo, una revisión sistemática brinda una síntesis global sobre cómo responde la avifauna a los incendios forestales en estos bosques, destacando patrones en la línea de investigación, vacíos de conocimiento y oportunidades futuras. El segundo capítulo traslada esta mirada al terreno mediante un estudio de caso en el PNSSPM, afectado por un incendio forestal de 4,000 ha durante el año 2003, donde se analizan los efectos de distintas severidades del fuego en el bosque, utilizando la riqueza de aves como indicador de estos efectos. Finalmente, el tercer capítulo ofrece una propuesta concreta: una herramienta post-incendio diseñada para fortalecer el plan de manejo del fuego en dicho parque, integrando la dimensión avifaunística a la toma de decisiones.

Esta tesis se propone contribuir no solo al entendimiento de los efectos ecológicos del fuego, sino también a la construcción de herramientas replicables que apoyen la gobernanza ambiental, el manejo adaptativo y la formulación de políticas públicas enfocadas en la resiliencia ecosistémica en zonas afectadas por incendios. De este modo, la investigación trasciende lo estrictamente ecológico para aportar soluciones integrales en el marco del desarrollo sustentable y la conservación ambiental, en consonancia con los objetivos del programa de Medio Ambiente y Desarrollo ante el cual se presenta.

## **Objetivos**

### *General*

Evaluar los efectos ecológicos de incendios forestales sobre la avifauna en bosques de coníferas, mediante una revisión sistemática y un estudio de caso en el PNSSPM, con el propósito de generar lineamientos prácticos para el monitoreo acústico y el manejo adaptativo post-incendio.

### *Particulares*

- Identificar, mediante un enfoque mixto, las palabras clave, temas centrales, autores influyentes y redes institucionales que conforman el campo de estudio sobre aves e incendios forestales, así como sistematizar los métodos empleados en censos de aves, evaluación de perturbaciones, estimación de la severidad del fuego y análisis estadísticos aplicados en investigaciones afines.
- Evaluar cómo la severidad del incendio forestal y la estacionalidad afectan la riqueza de aves en el bosque de coníferas del PNSSPM.
- Elaborar una guía práctica de monitoreo acústico post-incendio para aves, sustentada en evidencia de campo, con aplicaciones en la gestión de áreas naturales protegidas.

## **Justificación**

El fuego, aunque a menudo percibido como una amenaza para la biodiversidad, constituye un proceso ecológico esencial en muchos ecosistemas terrestres (Harrison *et al.*, 2019). Su recurrencia, favorecida por el cambio climático y las actividades humanas, ha intensificado la necesidad de comprender sus efectos ecológicos desde una perspectiva funcional y adaptativa (Hardesty *et al.*, 2005). Lejos de ser un fenómeno exclusivamente destructivo, el fuego puede desempeñar un papel regenerativo y constructivo, promoviendo la biodiversidad, la renovación de nutrientes y la heterogeneidad del paisaje (He *et al.*, 2019). Sin embargo, cuando su intensidad y frecuencia sobrepasan ciertos umbrales ecológicos, puede generar impactos negativos y duraderos en la estructura y función del ecosistema (Neary *et al.*, 2005).

La Sierra de San Pedro Mártir constituye un sitio particularmente adecuado para el estudio de los efectos del fuego a largo plazo, ya que ha mantenido un régimen de incendios relativamente continuo en comparación con otras regiones, conservando dinámicas ecológicas asociadas al fuego en gran parte de su extensión (Minnich *et al.*, 2000). Aunque la supresión del fuego no ha sido tan intensa como en el oeste de Estados Unidos, diversos estudios recientes indican que la frecuencia de incendios ha disminuido en las últimas décadas (Stephens *et al.*, 2020; Higuera *et al.*, 2022), lo cual podría estar generando acumulación de combustibles y mayor riesgo de incendios severos. Este contexto hace de SSPM un referente útil para entender los efectos ecológicos del fuego bajo condiciones históricas relativamente conservadas, pero también permite evaluar cómo los cambios recientes en el régimen pueden influir en los procesos de regeneración, estructura y función del ecosistema post-incendio. Así, los resultados obtenidos en esta región pueden aportar información valiosa para orientar estrategias de conservación y manejo en otros paisajes templados-mediterráneos con perturbaciones similares.

En este contexto, la severidad del fuego emerge como un indicador crítico para evaluar las consecuencias ecológicas de los incendios forestales. Entender cómo diferentes niveles de severidad afectan a la biota permite diseñar estrategias de restauración y manejo más informadas, adaptadas a la dinámica natural del ecosistema (Jones & Tingley 2022). Los bosques templados de la Sierra de San Pedro Mártir, en Baja California, ofrecen un escenario idóneo para este análisis, dado su valor ecológico, su alta biodiversidad y su régimen natural de incendios poco

perturbado (Minnich *et al.*, 2000; Rivera-Huerta *et al.*, 2016). En Baja California se tiene dos sierras que presentan este tipo de ecosistemas únicos en México y son la continuación del Ecosistema Mediterráneo Californiano que comprende los estados de California y Oregón en Estados Unidos (Stephens *et al.*, 2010; 2003; Williams *et al.* 2023; Mallek *et al.*, 2013).

Las aves son especialmente útiles como bioindicadores en este tipo de ecosistemas, ya que responden rápidamente a cambios en la estructura del hábitat y permiten inferir procesos de recuperación post-incendio. El monitoreo acústico pasivo, por su carácter no invasivo, repetible y eficiente en zonas de difícil acceso, representa una herramienta innovadora y escalable para el seguimiento ecológico.

Pese a su relevancia, en México son escasos los estudios que analicen los efectos del fuego sobre la avifauna con un enfoque cuantitativo y de largo plazo. Esta tesis contribuye a llenar ese vacío, al combinar una revisión sistemática de literatura internacional con un estudio de caso empírico veinte años después de un gran incendio, y una propuesta práctica de monitoreo post-incendio.

Por tanto, esta investigación es pertinente no solo en el ámbito científico, sino también en el técnico y el de gestión ambiental. Ofrece herramientas concretas para el diseño de estrategias de restauración ecológica y manejo del fuego en áreas naturales protegidas, en un contexto global donde se vuelve urgente adaptar las políticas de conservación a nuevos regímenes de perturbación.

## Metodología General

Esta investigación adopta un enfoque metodológico mixto que integra revisión sistemática, monitoreo acústico de campo y análisis estadístico multivariado. Se divide en tres fases: i) análisis bibliométrico y cualitativo de la literatura científica sobre fuego y avifauna; ii) estudio de caso empírico en el PMSSM para evaluar la relación entre severidad del fuego, estacionalidad y riqueza de aves; y iii) diseño de un protocolo técnico para el monitoreo post-incendio, orientado a su implementación en áreas naturales protegidas.

Primero, se realizó un análisis cuantitativo y cualitativo de 52 estudios publicados entre enero de 2000 y agosto de 2022, con el objetivo de identificar tendencias en las metodologías empleadas para estudiar los efectos del fuego sobre la avifauna, así como evaluar los niveles de severidad del fuego y los métodos estadísticos aplicados. La búsqueda se llevó a cabo exclusivamente en la base de datos *Web of Science*, utilizando una combinación de términos relacionados con incendios forestales (como *wildfire*, *biomass burning*, *post-fire*, entre otros), aves (*bird*, *avian*, *ornithology*, *avifauna*) y tipos de bosques templados (*temperate forest*, *pine*, *mixed forest*, etc.), excluyendo específicamente estudios sobre quemas prescritas, tratamientos forestales o sitios con perturbaciones combinadas como incendios y tala.

Para la selección de estudios, se aplicaron los siguientes criterios de inclusión: (1) publicaciones en revistas indizadas; (2) artículos originales, revisiones, capítulos, compendios o metanálisis; (3) trabajos en cualquier idioma; y (4) estudios realizados en ecosistemas de bosques templados. Por otro lado, se excluyeron: (1) investigaciones que incluyeran quemas prescritas, dada la diferencia en sus efectos ecológicos respecto a incendios naturales o silvestres; (2) estudios que no consideraran datos censales de aves; (3) estudios con múltiples tipos de perturbación (e.g., incendios combinados con tala); y (4) publicaciones anteriores al año 2000.

Los estudios seleccionados fueron analizados mediante la herramienta Biblioshiny, lo que permitió evaluar aspectos como indicadores bibliométricos, métodos de muestreo, enfoques para medir la severidad del fuego y las técnicas estadísticas empleadas. Este análisis bibliométrico brindó la base conceptual y metodológica para el diseño del estudio de campo.

El diseño del muestreo se basó en el uso de imágenes satelitales y mapas de severidad del incendio de 2003 (Rivera-Huerta *et al.*, 2016) para seleccionar ocho sitios representativos en el área de estudio: seis sitios en zonas afectadas por el incendio, distribuidos en categorías de severidad muy alta, alta y media-baja, y dos sitios de referencia en bosque no perturbado adyacente. Se respetaron criterios de accesibilidad, representatividad ecológica y espaciamiento, procurando que los sitios fueran comparables en condiciones ambientales (como altitud, pendiente y tipo de vegetación) y suficientemente distantes entre sí para evitar sesgos espaciales. Esta estrategia buscó maximizar la capacidad de detección de efectos reales del fuego sobre la avifauna, minimizando a la vez la pseudoreplicación y la influencia de variables de confusión (Underwood, 1997; McGarigal *et al.*, 2000). Asimismo, el número de sitios respondió tanto a criterios ecológicos como a limitaciones logísticas y presupuestales, dado que el acceso, instalación y revisión de grabadoras acústicas implicó recorridos extensos y condiciones de campo exigentes. La recolección de datos se efectuó mediante grabadoras acústicas *Wildlife Acoustic*, operando durante cuatro horas en horario matutino para captar la vocalización de las aves a lo largo de las estaciones climáticas, garantizando así una cobertura temporal adecuada.

Las grabaciones se analizaron con software especializado (*Raven PRO* y *BirdNet Global 6K*) para identificar especies y obtener datos de riqueza de avifauna, los cuales fueron depurados para eliminar registros erróneos o poco confiables. Posteriormente, los datos fueron analizados estadísticamente en R (*R Core Team*, 2024) mediante un modelo lineal generalizado con distribución binomial negativa, implementados a través del paquete *MASS*. Se evaluó la relación entre la riqueza de aves, la severidad del incendio y la estación del año. Para seleccionar el modelo más parsimonioso se utilizó el criterio de información de Akaike (AIC). La validación del modelo incluyó pruebas de ajuste como el test de Kolmogorov-Smirnov; la inspección visual de residuos mediante gráficos cuantil-cuantil y de dispersión de residuos versus valores ajustados, utilizando funciones del paquete *car*. El modelo final mostró un buen ajuste y distribución de residuos, cumpliendo con los supuestos de independencia y dispersión para datos de conteo.

Finalmente, esta investigación incluyó la elaboración de un esquema estructurado para el seguimiento y monitoreo post-incendio, concebido para fortalecer las acciones de manejo y

recuperación en áreas naturales protegidas. Este protocolo no fue producto únicamente del análisis estadístico, sino que se desarrolló a partir de diálogo directo con la directora del PMSSPM, con el objetivo de identificar fortalezas, deficiencias y necesidades concretas en los procesos actuales de monitoreo.

Con base en esta retroalimentación, se definieron criterios claros para la selección de áreas afectadas y no afectadas, así como un diseño detallado de muestreos adaptado a la severidad del fuego y la estacionalidad, orientado a generar información útil y aplicable para el manejo del parque. Además, se fundamentó la importancia de las aves como indicadores ecológicos clave, se plantearon métodos comparativos para el análisis de datos, y se incluyeron recomendaciones para integrar los resultados en futuros planes de manejo del fuego.

Este enfoque participativo y orientado a la gestión busca ofrecer una herramienta práctica y científicamente sólida que facilite la conservación y resiliencia de los ecosistemas forestales frente a los impactos de incendios y el cambio climático.

## Bibliografía

- Beverly, J. L., Leverkus, S. E., Cameron, H., & Schroeder, D. (2020). Stand-Level Fuel Reduction Treatments and Fire Behaviour in Canadian Boreal Conifer Forests. *Fire*, 3(3), 35. <https://doi.org/10.3390/fire3030035>.
- Levine, C. R., Krivak-Tetley, F., van Doorn, N. S., Ansley, J.-A. S., & Battles, J. J. (2016). Long-term demographic trends in a fire-suppressed mixed-conifer forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 46(5), 745-752. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0406>
- Gregory, R. D., Noble, D., Field, R., Marchant, J., Raven, M., & Gibbons, D. W. (2003). Using birds as indicators of biodiversity. *Ornis Hungarica*, 12(13), 11-24.
- Hardesty, J., Myers, R., & Fulks, W. (2005). Fire, Ecosystems, and People: A Preliminary Assessment of Fire as a Global Conservation Issue. *The George Wright Forum*, 22(4), 78–87. <http://www.jstor.org/stable/43597968>
- Hargrove, L., & Unitt, P. (2018). Responses of birds to large-scale wildfires in southern California, in *Trends and traditions: Avifaunal change in western North America* (W. D. Shuford, R. E. Gill Jr., & C. M. Handel, Eds.), pp. 374–399. *Studies of Western Birds 3*. Western Field Ornithologists, Camarillo, CA; <https://doi.org/10.21199/SWB3.20>.
- Harrison, S., Marlon, J., & Bartlein, P. (2010). Fire in the Earth System. In: Dodson, J. (Ed.), *Changing Climates, Earth Systems and Society*. International Year of Planet Earth. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-8716-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-90-481-8716-4_3)
- He, T., Lamont, B. B., & Pausas, J. G. (2019). Fire as a key driver of Earth's biodiversity. *Biological Reviews*, 94(6), 1983–2010. <https://doi.org/10.1111/brv.12544>
- Higuera, P. E., Abatzoglou, J. T., Littell, J. S., & Morgan, P. (2022). Recent declines in fire frequency and area burned in the western United States reflect changing climate and fuel dynamics. *Ecological Applications*, 32(1), e2844. <https://doi.org/10.1002/eap.2844>
- Hutto, R. L., Conway, C. J., Saab, V. A., & Walters, J. R. (2008). What Constitutes a Natural Fire Regime? Insight from the Ecology and Distribution of Coniferous Forest Birds in North America. *Fire Ecology*, 4(2), 115-132. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0402115>
- Jones, G. M., & Tingley, M. W. (2022). Pyrodiversity and biodiversity: A history, synthesis, and outlook. *Diversity and Distributions*, 28(3), 386–403. <https://doi.org/10.1111/ddi.13481>
- Kelly, L. T., & Brotons, L. (2017). Using fire to promote biodiversity. *Science*, 355(6331), 1264–1265. <https://doi.org/10.1126/science.aam7672>
- Krawchuk, M. A., Meigs, G. W., Cartwright, J. M., Coop, J. D., Davis, R., Holz, A., Kolden, C., &

- Meddens, A. J. (2020). Disturbance refugia within mosaics of forest fire, drought, and insect outbreaks. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 18(5), 235-244. <https://doi.org/10.1002/fee.219>
- Mallek, C., Safford, H. D., Viers, J. H., & Miller, J. D. (2013). Modern departures in fire severity and area vary by forest type, Sierra Nevada and southern Cascades, California, USA. *Ecosphere*, 4(12), 1-28. <https://doi.org/10.1890/ES13-00131.1>
- McGarigal, K., Cushman, S., & Stafford, S. (2000). *Multivariate statistics for wildlife and ecology research*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1288-1>
- Minnich, R. A., Barbour, M. G., Burk, J. H., & Sosa-Ramirez, J. (2000). Californian mixed-conifer forests under unmanaged fire regimes in the Sierra San Pedro Mártir, Baja California, Mexico. *Journal of Biogeography*, 27(1), 105–129. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2000.00367.x>
- Murphy, J. S., York, R., Rivera Huerta, H., & Stephens, S. L. (2021). Characteristics and metrics of resilient forests in the Sierra de San Pedro Martír, Mexico. *Forest Ecology and Management*, 482, 118864. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118864>
- Nappi, A., & Drapeau, P. (2009). Reproductive success of the Black-backed Woodpecker (*Picoides arcticus*) in burned boreal forests: are burns source habitats? *Biological Conservation*, 142, 1381–1391. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.01.022>
- Neary, D. G., Ryan, K. C., & DeBano, L. F. (2005). *Wildland fire in ecosystems: effects of fire on soils and water*. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42-vol. 4. Ogden, UT: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Rivera-Huerta, H., Safford, H. D., & Miller, J. D. (2016). Patterns and trends in burned area and fire severity from 1984 to 2010 in the Sierra de San Pedro Mártir, Baja California, Mexico. *Fire Ecology*, 12(1), 52–72. <https://doi.org/10.4996/fireecology.1201052>
- Stephens, S. L., Skinner, C. N., & Gill, S. J. (2003). Dendrochronology-based fire history of Jeffrey pine - mixed conifer forests in the Sierra San Pedro Mártir, Mexico. *Canadian Journal of Forest Research*, 33(6), 1090-1101. <https://doi.org/10.1139/x03-031>
- Stephens, S. L., Fossum, C., Collins, B. M., & Rivera Huerta, H. (2024). Early impacts of fire suppression in Jeffrey pine – Mixed conifer forests in the Sierra San Pedro Mártir, Mexico. *Forest Ecology and Management*. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122003>
- Stephens, S. L., Fry, D. L., Collins, B. M., Skinner, C. N., Franco-Vizcaíno, E., & Freed, T. J. (2010). Fire-scar formation in Jeffrey pine – mixed conifer forests in the Sierra San Pedro Mártir, Mexico. *Canadian Journal of Forest Research*, 40(8), 1497-1505.

<https://doi.org/10.1139/X10-083>

- Shonfield, J., & Bayne, E. (2017). Autonomous recording units in avian ecological research: current use and future applications. *Avian Conservation and Ecology*, 12(1).
- Siegel, R., Tingley, M., Wilkerson, R., Howell, C., Johnson, M., & Pyle, P. (2016). Age structure of Black-backed Woodpecker populations in burned forests. *The Auk*, 133, 69-78. <https://doi.org/10.1642/AUK-15-137.1>
- Stephens, S. L., Fry, D. L., & Franco-Vizcaíno, E. (2008). Wildfire and spatial patterns in forests in northwestern Mexico: the United States wishes it had similar fire problems. *Ecology and Society*. [https://core.ac.uk/outputs/48025337/?utm\\_source=pdf&utm\\_medium=banner&utm\\_campaign=pdf-decoration-v1](https://core.ac.uk/outputs/48025337/?utm_source=pdf&utm_medium=banner&utm_campaign=pdf-decoration-v1)
- Stephens, S. L., Kobziar, L. N., Collins, B. M., Davis, R., Fulé, P. Z., Gaines, W., Ganey, J., Guldin, J. M., Hessburg, P. F., Hiers, K., Hoagland, S., Keane, J. J., Masters, R. E., McKellar, A. E., Montague, W., North, M., & Spies, T. A. (2019). Is fire “for the birds”? How two rare species influence fire management across the US. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 17(7), 391-399. <https://doi.org/10.1002/fee.2076>
- Underwood, A. J. (1997). *Experiments in ecology: Their logical design and interpretation using analysis of variance*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511806407>
- Williams, J. N., Safford, H. D., Enstice, N., Steel, Z. L., & Paulson, A. K. (2023). High-severity burned area and proportion exceed historic conditions in Sierra Nevada, California, and adjacent ranges. *Ecosphere*, 14(1), e4397. <https://doi.org/10.1002/ecs2.4397>
- Wright, H. E., & Heinselman, M. L. (2014). The Ecological Role of Fire in Natural Conifer Forests of Western and Northern North America—Introduction. *Fire Ecology*, 10, 4–13. <https://doi.org/10.1007/BF03400628>

## CAPÍTULO I

### A SYSTEMATIC REVIEW OF THE TRENDS AND METHODOLOGIES IN RESEARCH ON THE EFFECTS OF WILDFIRES ON AVIFAUNA IN TEMPERATE FORESTS.

**Trabajo publicado en “Ardeola: International Journal of Ornithology”:** Ramírez Sánchez, D., Seingier, G., De León Girón, G., Villada Canela, M., Steel, Z. L., & Rivera Huerta, H. (2025). A systematic review of trends and methodologies in research on the effects of wildfires on the avifauna in temperate forests. *Ardeola*, 72(1), 105–120. <https://doi.org/10.13157/arla.72.1.2025.rp1>

#### Resumen

Las percepciones sobre la relación entre ecosistemas forestales e incendios han evolucionado. La intervención de incendios forestales se reconoce ahora como crucial para mantener la funcionalidad de bosques adaptados al fuego. Aunque la investigación sobre el impacto del fuego en la fauna ha crecido notablemente, no existe un consenso sobre sus efectos globales debido a las respuestas variables de las comunidades faunísticas entre taxones. Esta revisión proporciona una síntesis bibliométrica sobre los incendios forestales y sus efectos en la avifauna de bosques templados, identifica patrones y lagunas en las metodologías de investigación, y ofrece recomendaciones para futuras investigaciones. Utilizamos métodos cuantitativos y cualitativos para analizar 52 estudios sobre los efectos de incendios en aves de bosques templados desde enero de 2000 hasta agosto de 2022. Evaluamos datos bibliométricos, metodologías de muestreo, evaluaciones de disturbios por fuego, niveles de severidad del fuego y análisis estadísticos. Aproximadamente el 50% de los estudios no incluyeron niveles de severidad del fuego, el 38% no usó áreas de control o datos previos a la perturbación, y el 60% empleó modelización estadística. Recomendamos incluir áreas de referencia no perturbadas y considerar grados de severidad al diseñar censos de avifauna, especialmente para justificar las conclusiones del estudio, planes de manejo o actividades de conservación en áreas afectadas por incendios.

**Palabras clave:** Análisis bibliométrico, aves, conservación, bosque templado, método estadístico, fuego, factor de impacto.

## Review

### A SYSTEMATIC REVIEW OF TRENDS AND METHODOLOGIES IN RESEARCH ON THE EFFECTS OF WILDFIRES ON THE AVIFAUNA IN TEMPERATE FORESTS

### REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LAS TENDENCIAS Y METODOLOGÍAS EN LA INVESTIGACIÓN SOBRE LOS EFECTOS DE LOS INCENDIOS FORESTALES EN LA AVIFAUNA EN BOSQUES TEMPLADOS

Diana RAMÍREZ SÁNCHEZ<sup>1</sup>, Georges SEINGIER<sup>2</sup>,  
Gonzalo DE LEÓN GIRÓN<sup>3</sup>, Mariana VILLADA CANELA<sup>1</sup>,  
Zachary L. STEEL<sup>4</sup> and Hiram RIVERA HUERTA<sup>2\*</sup>

**SUMMARY.**—Perceptions of the relationships between forest ecosystems and wildfires have evolved. The ecological role of wildfires is now recognised as essential for maintaining the functionality of fire-adapted forests. Although research on the impact of fire on fauna has grown notably, there is a lack of consensus on its global effects due to the variable responses of faunal communities across taxa. This review provides a bibliometric synthesis of wildfires and their impact on avifauna in temperate forests. It identifies patterns and gaps in research methodologies and offers recommendations for future studies. We employed quantitative and qualitative methods to analyse 52 studies on the effects of wildfires on avifauna in temperate forests from January 2000 to August 2022. We evaluated bibliometric data, sampling methodologies, fire disturbance assessments, fire severity levels and statistical analyses. Approximately 50% of the studies did not include fire severity levels, 38% did not use control areas or pre-disturbance data and only 60% employed statistical modelling. We recommend incorporating undisturbed reference areas and considering severity levels when designing avifaunal censuses, manage-

---

<sup>1</sup> Institute of Oceanological Research, Autonomous University of Baja California, Transpeninsular Highway 3917, Ensenada 22860, Baja California, México.

<sup>2</sup> Faculty of Marine Sciences, Autonomous University of Baja California, Transpeninsular Highway Ensenada-Tijuana 3917, Postal Code 22860, Ensenada, Baja California, México.

<sup>3</sup> Faculty of Sciences, Autonomous University of Baja California, Transpeninsular Highway Ensenada-Tijuana 3917, Postal Code 22860, Ensenada, Baja California, México.

<sup>4</sup> USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 240 West Prospect Rd., Fort Collins, Postal Code 80525. CO, USA.

\* Corresponding author: hiram@uabc.edu.mx

ment plans and conservation activities in fire-affected areas.—Ramírez Sánchez, D., Seingier, G., De León Girón, G., Villada Canela, M., Steel, Z.L. & Rivera Huerta, H. (2025). A systematic review of trends and methodologies in research on the effects of wildfires on the avifauna in temperate forests. *Ardeola*, 72: 105-120.

**Keywords:** bibliometric analysis, birds, conservation, fire, impact factor, temperate forest, statistical method.

**RESUMEN.**—Las percepciones sobre la relación entre ecosistemas forestales e incendios han evolucionado. La intervención de incendios forestales se reconoce ahora como crucial para mantener la funcionalidad de bosques adaptados al fuego. Aunque la investigación sobre el impacto del fuego en la fauna ha crecido notablemente, no existe un consenso sobre sus efectos globales debido a las respuestas variables de las comunidades faunísticas entre taxones. Esta revisión proporciona una síntesis bibliométrica sobre los incendios forestales y sus efectos en la avifauna de bosques templados, identifica patrones y lagunas en las metodologías de investigación, y ofrece recomendaciones para futuras investigaciones. Utilizamos métodos cuantitativos y cualitativos para analizar 52 estudios sobre los efectos de incendios en aves de bosques templados desde enero de 2000 hasta agosto de 2022. Evaluamos datos bibliométricos, metodologías de muestreo, evaluaciones de disturbios por fuego, niveles de severidad del fuego y análisis estadísticos. Aproximadamente, el 50 % de los estudios no incluyeron niveles de severidad del fuego, el 38 % no usó áreas de control o datos previos a la perturbación, y el 60% empleó modelización estadística. Recomendamos incluir áreas de referencia no perturbadas y considerar grados de severidad al diseñar censos de avifauna, especialmente para justificar las conclusiones del estudio, planes de manejo o actividades de conservación en áreas afectadas por incendio.—Ramírez Sánchez, D., Seingier, G., De León Girón, G., Villada Canela, M., Steel, Z.L. y Rivera Huerta, H. (2025). Revisión sistemática de las tendencias y metodologías en la investigación sobre los efectos de los incendios forestales en la avifauna en bosques templados. *Ardeola*, 72: 105-120.

**Palabras clave:** análisis bibliométrico, aves, bosque templado, conservación, factor de impacto, fuego, método estadístico.

## INTRODUCTION

Our understanding of the dynamics between fire and forest ecosystems has evolved over the years, with the paradigm of natural area management undergoing substantial modifications, particularly concerning intensive fire suppression (Keeley *et al.*, 1999; Bowman *et al.*, 2009; Pausas & Keeley, 2019). Fire is essential for the proper functioning of various ecosystems (Kozlowski & Ahlgren, 1974; Richards *et al.*, 1999; González *et al.*, 2022; Steel *et al.*, 2024; Jones & Tingley, 2022; Hessburg *et al.*, 2007; Gill & Allan, 2008; Keane *et al.*, 2008; Pausas & Vallejo, 2008; Keeley, 2009; Miller *et al.*, 2012). Recent wildfire catastrophes and predictions indicating an escalation in fire inci-

dents (Bowman *et al.*, 2009, 2020; Jolly *et al.*, 2015) have exerted mounting pressure on academics and land managers to devise mitigation strategies for this phenomenon. This surge has resulted in a plethora of case studies, reviews, syntheses and compilations on the effects of wildfire on fauna since the 1950s (Prodon & Pons, 1993; Brawn *et al.*, 2001; Kennedy & Fontaine, 2009; Leidolf & Bissonette, 2009; Fontaine & Kennedy, 2012). One such strategy is the use of prescribed burns, which has gained attention as a potential tool to manage fire regimes and reduce the risk of uncontrolled wildfires. However, researchers have observed contrasting outcomes regarding the benefits of implementing surrogate wildfire interventions, such as prescribed burns, which can

either increase or reduce habitat diversity depending on the context (Schieck & Song, 2006; Prowse *et al.*, 2017). This inconsistency has introduced uncertainty into proposed management actions. Indeed, Kennedy and Fontaine (2009) synthesised results from multiple studies in fire-dependent dry forests in the United States and found that, based on the available research, they were unable to provide definitive recommendations for prescribed burns or other fire-mimicking activities.

Given this uncertainty, studying bird responses to wildfire can provide valuable insights and reveal important patterns and trends in the overall health and dynamics of forest ecosystems, because birds are reliable indicators of change for multiple ecological processes (Dale & Beyeler, 2001). As scientists can gain valuable information by studying how bird populations and behaviours respond to fire events, there has been a notable increase in research on avian responses to wildfire (Blake, 1982; Aquilani *et al.*, 2003; Saab & Powell, 2005; González *et al.*, 2022). For example, research in this area can elucidate changes in habitat quality (e.g. Driscoll *et al.*, 2021), biodiversity (e.g. Gill *et al.*, 2003), and ecological resilience (e.g. Eisenberg *et al.*, 2019), which are critical for developing effective forest management and conservation strategies.

Monitoring changes in bird populations and forests following wildfires is important for assessing ecosystem resilience and recovery. Prodon & Pons (1993) conducted a literature analysis that highlights the methodological challenges of observing post-fire dynamics through bird responses. Their conclusions underscored the complexity of reviews and meta-analyses, emphasised a need for conclusiveness and encouraged the exploration of other methodologies in order to generate robust results. This call for new methodologies underscores the importance of analysing the current literature in shaping

future research. It also presents researchers with opportunities to conduct studies with meaningful impacts. Leidolf & Bissonet (2009) furthered this call by emphasising the urgent need for critical reviews that evaluate the current understanding of bird responses to wildfire, rather than conducting research that statistically evaluates the results of case studies.

Temperate forests have experienced wildfires throughout their evolution. Given the prevalence and threats posed by fire, these forests are often subject to management and conservation policies. Furthermore, temperate forests also provide a valuable framework and important opportunities for studying the impacts of wildfires on ecologically diverse and globally relevant ecosystems, as well as opportunities to further natural resource management and conservation strategies that promote ecosystem resilience.

Unlike previous reviews that have focused on normalising results with statistics to identify patterns in bird census data, we aimed to evaluate the principal strategies and directions of the research on the effects of wildfires on avifauna. Our systematic review aims to make it easy for researchers to identify gaps in research methodologies. This review is divided into two sections: 1) a quantitative analysis following a bibliometric approach and 2) qualitative analyses, which we used to organise the methods of the published studies. Quantitative methods were initially employed to conduct a statistical analysis of the metadata obtained from Web of Science (WOS). Subsequently, qualitative methods were used to examine each article in depth, allowing for a richer and more contextualised understanding of the information. Our goals for quantitative research included identifying keywords and critical themes, key authors and the institutional networks that contribute to this field. The qualitative goal was to elucidate methods for conducting bird censuses, disturbance assessments, evalua-

tions of fire severity and statistical analyses. Finally, we offer recommendations for future research in these areas.

## METHODS

We employed the problem, intervention, comparison, and outcome (PICO) model (Supplementary material, Appendix 1, Table A1) to structure our search strategy and identify key terms.

Renowned for its discerning selection of indexed sources, WOS outperforms other scientific databases, including SCOPUS, ELSEVIER, Dimensions, Crossref, and Microsoft Academic (Visser *et al.*, 2021). For our systematic review, we used WOS (search date: September 2022) and applied the following search criteria:

### Inclusion criteria:

1. Publications in indexed journals.
2. Types of publications: original articles, syntheses, compendiums, chapters, books, meta-analyses and reviews.
3. Publications in any language.
4. Research conducted in geographical locations with temperate forest ecosystems.

### Exclusion criteria:

1. Studies involving prescribed burns in any form. We ensured that the studies independently and carefully evaluated the ecological effects of wildfires, which differ significantly from those of human-controlled burns (Prowse *et al.*, 2017; Francos & Úbeda, 2021; Saab *et al.*, 2022).
2. Studies that did not consider bird census data.
3. Studies that included more than one kind of perturbation in the method design (e.g., studies that included areas affected by wildfires and logging).
4. Studies before the year 2000.

By employing these criteria, we ensured that our review focused solely on the effects of wildfires, which have unique ecological impacts that must be studied separately from human interventions.

The core aspects of this research revolved around three fundamental topics: birds, fire and temperate forests. We thoroughly analysed synonyms and related terms in the documents retrieved from the WOS database. To this end, we constructed a comprehensive and controlled vocabulary after searching for terms associated with these topics in a life science thesaurus (<https://universoabierto.org/2016/05/31/tesauros-y-glosarios-disponibles-en-linea-2/>, consulted August 2022). Supplementary material, Appendix 1, Table A2 presents the three primary topics and their synonyms.

Including the genus *Pinus* was pivotal in the search equation, as it is a key genus that resides in the vegetation that is characteristic of temperate forests. However, we did not exclude studies that did not include *Pinus*. We searched for controlled vocabulary words in the abstracts, titles and keywords. We formulated a canonical search equation using Boolean logic and the logical operators 'AND', 'OR', and 'NOT' (Supplementary material, Appendix 1, Table A2). To conduct searches in different manuscript sections, codes 'TI', 'AB', and 'AK' were used for the title, abstract and keywords.

We used the metadata within WOS to identify information in the following fields of the selected studies: author, title, source, sponsor, number of citations, accession number, author identifier, ISSN, PubMedID, abstract, address, affiliation, document type, keywords, WoS category, research, cited references, cited references count, usage count, highly cited, funding information, publisher information, page count, source abbreviation, IDS number, language and research area. We used the Biblioshiny application via the 'Bibliometrix' package (v. 3.0.4) in R v. 1.4.1103

(R Core Team, 2020). Biblioshiny was chosen for its capabilities in bibliometric data mapping and because it is recognised as one of the most comprehensive tools in bibliometric research due to its user-friendly interface (Silva *et al.*, 2022). Biblioshiny is also recognised for allowing researchers to perform detailed bibliometric analyses, regardless of their level of expertise. To avoid pseudo-replication in the keywords section, we used a list of synonyms and grouped similar concepts (Supplementary material, Appendix 1, Table A3).

We decided to use studies from 2000 onwards, as this was the last year a comprehensive review on birds and fire was conducted (Lyon *et al.*, 2000). Although valuable reviews were conducted later, such as those by Leidolf & Bissonette (2009) and Kennedy & Fontaine (2009), these did not fully meet our criteria. The review of Leidolf & Bissonette (2009) is a bibliometric synthesis that focuses on data of authors and journals and does not provide an in-depth review of the effects of fire on avifauna. Meanwhile, the review of Kennedy & Fontaine (2009) is more comprehensive, although it focuses specifically on dry forest ecosystems, which limits its applicability to other ecosystems.

#### *Quantitative method*

Bibliometric analysis can provide structured and data-driven insights into the state and evolution of a research field, facilitating strategic planning for future studies. We evaluated various studies using diverse descriptors related to authors, journals, impact factors and local citations. With Biblioshiny, we evaluated the impacts of journals and researchers, focusing on the number of articles per journal and citations per article (Wilczewski & Alon, 2022; Hirsch & Buéla-Casal, 2014).

We conducted a keyword frequency assessment and co-occurrence analysis, as well

as conceptual thematic mapping (Sedighi, 2006; Cobo *et al.*, 2012; Sudolska, 2017). We examined the keyword usage frequency across studies and created a thematic map based on trends from 2000 to 2022 (Figure 3). Out of the keywords of the 52 scientific studies reviewed, we selected those that appeared at least three times, to analyse the connections among them. This criterion may have excluded some rare keywords, but it effectively reduced noise from overly specific terms found in case studies, thus enhancing the clarity of the connections. From the graphic results, we identified principal research interests and keyword clusters based on thematic groupings. To further ensure that the keywords of the articles accurately reflected the article content, we conducted a co-occurrence analysis. This analysis was also based on keyword frequency (detailed in Supplementary material, Appendix 2, Table B3).

#### *Qualitative method*

To be included in the qualitative analysis, a study was required to meet at least one of the following criteria: A) it evaluated the effects of wildfire on avifauna and addressed some effects at the community or species level. B) it explicitly characterised a fire-related factor by describing elements of the fire regime, such as the time elapsed since the fire, the extent of burned area or severity. C) it provided evidence of fire effects through descriptions, including the changes induced after the disturbance, the differences between control and disturbed areas or the fire history. D) it included bird data by presenting lists of surveyed bird species or other metrics of the avifaunal community.

For each study, we obtained the following information: the size of the burned area, fire severity level, comparisons between burned and unburned areas, time elapsed since the

fire, the protection category of the burned area, information on specific bird species or the bird community, the sampling method and the statistical analysis employed.

Consequently, we identified 52 relevant articles on the impacts of wildfire on avifauna in temperate forests worldwide.

## RESULTS AND DISCUSSION

We identified 217 documents in the initial WOS search. Only some of the papers were pertinent to research on the effects of wildfires on birds in temperate forests; many documents included key concepts but did not focus on their search topic. We read 217 abstracts and excluded non-pertinent research. We identified 85 documents, meticulously reviewed them to determine if they included avifauna variables and determined if they met the inclusion or exclusion criteria.

### *Bibliometric results*

Over the study period, the growth rate of scientific article production was  $-3\%$ , which reflected a decrease in publications since 2000. This decline may reflect a maturation of the research field, with researchers choosing to focus on expanding and refining existing knowledge rather than exploring entirely new topics. However, this decrease in publication output could also be attributed to a range of other factors, such as a reduced interest in the field, shifts in political priorities, changes in funding availability, or global



FIG. 1.—Map of collaborations among countries in research on the impacts of forest fires on temperate forests, employing birds as indicators. Greyscale intensity indicates the number of publications produced in each country. The red lines indicate collaborations among authors.

[Mapa de colaboraciones entre países en la investigación sobre los impactos de los incendios forestales en bosques templados utilizando aves como indicadores. La intensidad en escala de grises refleja el número de publicaciones producidas en cada país. Las líneas rojas señalan las colaboraciones entre autores.]

events impacting scientific production, including economic crises or the effects of the COVID-19 pandemic. Supplementary material, Appendix 2, Table B1 summarises the bibliometric data.

The most notable international research collaborations were observed between the United States and Sweden, followed by Brazil, the United Kingdom, Canada and Chile (Figure 1). Although collaborations existed among these countries, they accounted for only 15% of all research on the effects of wildfires on avifauna in temperate forests. This suggests that the remaining 85% of studies were conducted within individual countries without international collaboration. These results highlight a need for international collaboration to strengthen and optimise research efforts. For example, opportunities exist for collaborations among countries that share temperate forests that cross international borders (e.g., California, USA and Baja California, Mexico). It is no-

table that only one published document on this topic came from Mexico, despite 16% of its territory comprising temperate forest ecosystems (Rzedowski, 2006; CONABIO, 2014; Challenger, 1998) and fire playing a notable role in the country's forests.

The 52 documents were published in 30 indexed scientific journals by 182 authors. Biblioshiny evaluates author productivity by examining the correlation between the number of published documents and citations. Figure 2 illustrates author output throughout the years and offers insights into metrics such as published documents and the total number of citations received each year. From 2000 to 2022, the top five most productive authors were Lluís Brotons, Rodney B. Siegel, Craig R. Allen and David G. Angeler. The journals with the most outstanding performance regarding publications on the impact of fire on birds in temperate forests were *Condor*, *Forest Ecology and Management*, *American Midland Naturalist*, *Ecosphere* and *PLOS*

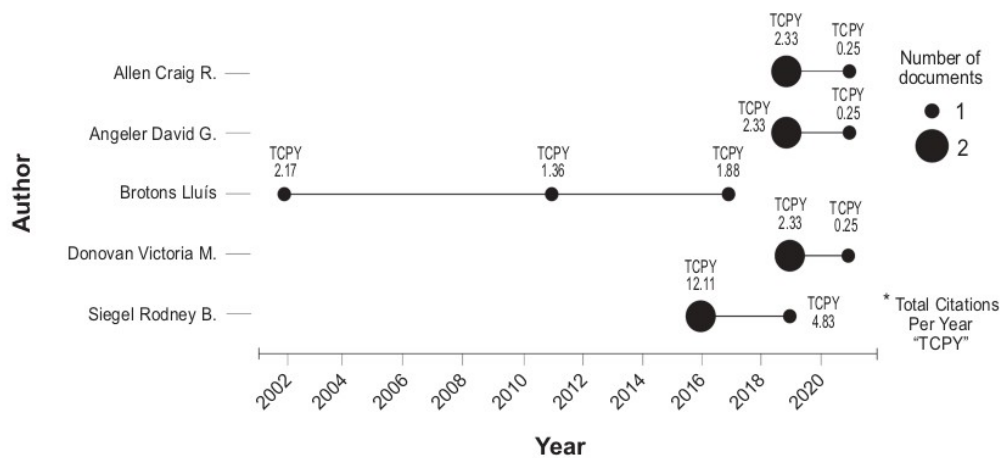


FIG. 2.— Authors with the highest productivity from 2000 to 2022. The black lines depict the publication timeline. The circles represent published documents, with large circles indicating two documents and small circles one document. TCPY: total citations per year.

[Autores con mayor productividad de 2000 a 2022. Las líneas negras muestran la línea de tiempo de publicación. Los círculos representan los documentos publicados, siendo los grandes indicativos de dos documentos y los pequeños de uno. TCPY: citas totales por año.]

*ONE.* This suggests that these journals are reliable sources that are frequently referenced in this field.

While these journals share the general goal of disseminating scientific research in environmental, agricultural and biological sciences, their publication focuses fall into four categories, according to Scimago Journal & Country Rank: 1) Ecology, Evolution, Behaviour and Systematics; 2) Animal Science and Zoology; 3) Ecology; and 4) Nature and Landscape Conservation. Thus, these journals have distinct editorial focuses despite sharing similar general objectives. These differences could influence where specific research on the impact of wildfire on birds is published. The diversity among these categories suggests that the impact of fire on avifauna in temperate forests spans multiple disciplines and encompasses multiple areas of study, from ecology and evolution to nature and landscape conservation. This breadth and depth provide opportunities for researchers to explore new avenues and collaborate across disciplines.

#### *Keywords and thematic map*

Of the 283 keywords compiled from the 52 scientific studies reviewed, the most frequently used were 'fire', 'fire severity', 'conifer forest' and 'avifauna'. This alignment with our strategic search confirms that the studies primarily focused on the impact of wildfires on avifauna in temperate forests.

The analysis of 283 key terms enabled us to create a strategic thematic map that provides an overview of the maturity of these themes, which have already been the subject of various studies (Figure 3). In the map, the themes are depicted as circles, whose size is proportional to the number of documents and associated local citations.

The thematic map has four quadrants:

1. Motor themes (upper right) are central and well-developed themes. In this case, the identified themes were habitat, disturbance and the temperate forests of Florida (USA). These themes reflect a growing research focus on fire disturbance, particularly in forests in Florida (USA).
2. Basic themes (lower right) are central but underdeveloped themes. The foundational themes include fire, the Bayesian multi-species occupancy model and remote sensing. These themes suggest that studies on the impact of fire on avifauna in temperate forests frequently employ advanced methods to estimate species density or abundance through Bayesian multi-species occupancy models, which continue to experience methodological development and expanded use.
3. Emerging or declining themes (lower left) are marginal and underdeveloped. Here, post-fire and ecological memories were identified. Post-fire, in particular, shows potential to become a motor theme, indicating an increasing focus on studying forest fires in temperate forests. This potential evolution of post-fire as a motor theme piques our interest and should inspire further research in this area.
4. Niche themes (upper left in the thematic map) are marginal but well-developed. No niche themes were identified in the strategic map.

The thematic analysis, which provided a structured view of research on the effects of fire on avifauna in temperate forests, serves as a comprehensive guide for identifying key research areas and shaping future research directions. This type of analysis prioritises topics by exposing gaps in the existing literature and can be used to inform conservation strategies and policymaking by highlighting

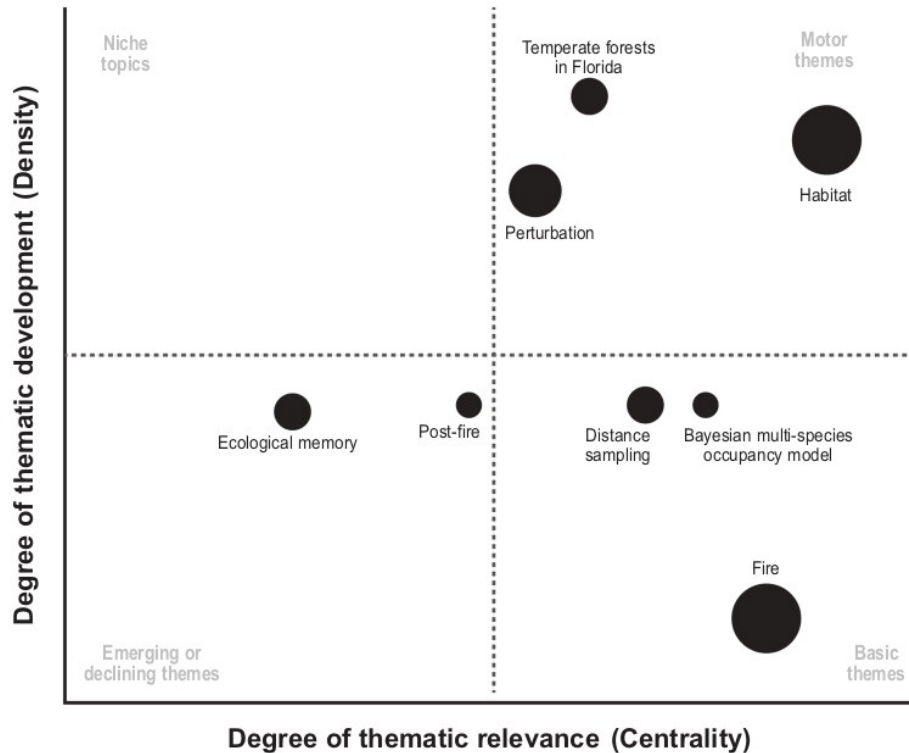


FIG. 3.—Thematic keyword map. Larger circle sizes indicate a greater co-occurrence of words connected to the main word node.

[Mapa temático de palabras clave. Tamaños más grandes reflejan una mayor coocurrencia de palabras asociadas al nodo principal.]

the most critical themes and findings. Thematic analysis can also be used to identify mature themes and those in development or decline within the field. This comprehensive assessment elucidated the methodologies used to analyse the data across studies.

#### Sampling method

Point counts were the favoured methodology for bird censuses (Supplementary material, Appendix 2, Table B4). Point counts are a relatively straightforward and cost-effective option for monitoring bird popu-

lations. This methodology yields valuable spatial and temporal data and enables efficient biodiversity assessments in different habitats (Ralph & Scott, 1981; Ralph *et al.*, 1993; Bibby *et al.*, 1998; Sutherland *et al.*, 2004). Consistency across counting methodologies facilitates data comparisons over time and among locations, allowing for long-term studies on bird populations that take advantage of published data. However, variability in bird detection, observer skill, weather conditions and vegetation presence, can introduce bias into the results (Ralph *et al.*, 1995).

From the description of the sampling designs collected during this review, the results

revealed a predominant trend towards the use of point counts for bird sampling, which considers both the advantages of its simplicity and its disadvantages related to potential bias (Buckland, 2006; Lee & Marsden, 2008). In some cases, by combining this technique with additional approaches and carefully considering contextual factors, researchers can maximise the utility of the collected data to gain a more complete understanding of the dynamics of bird populations in their natural environments (Watson, 2003; Thompson, 2002; Wheeldon *et al.*, 2019; Pérez-Granados & Traba, 2021).

It is essential to acknowledge the limitations associated with the use of point counts as well as other methods such as line transects or automated recording unit surveys. There does not appear to be a consensus as to the best survey method (Wilson *et al.*, 2000; Taulman, 2013) and, as noted above, each method is sensitive such factors as observer skill, weather conditions and vegetation presence that may bias the results (Ralph *et al.*, 1993). Their relative strengths and weaknesses should be weighed along with the specific study objective when assessing the impacts of fire on avian communities.

This trend was evident in the studies highlighted in this review, such as those by Kotliar *et al.* (2007); Rost *et al.* (2015); Flesch *et al.* (2016); Sitters *et al.* (2016); Smucker *et al.* (2005). These authors implemented a combination of point counts and additional methodologies to minimise potential bias. However, the vast majority of studies only used point counts. It is important to note that all methods have limitations and potential bias, so implementing a combination of techniques can improve the fidelity of the data.

#### *Disturbance assessment*

The attributes selected to assess fire disturbances are essential for understanding

the effects of wildfire and for designing forest management strategies (Keane & Karau, 2010; Glikson, 2013; Scott *et al.*, 2014; Pyne, 2016). The quality of the methodology determines the reliability and applicability of the results, directly influences the effectiveness of restoration strategies and minimises negative impacts (Brewer, 2005; Eidenshink *et al.*, 2007; Keeley, 2009). Well-designed methodologies are critical for generating reliable and reproducible results, accurately interpreting data (Van Leeuwen *et al.*, 2010; Landi *et al.*, 2017) and reducing statistical bias.

Of the studies in this review, 42% (22 papers) included an unburned control area, whereas 38% (20 papers) did not. Only 9% (five papers) employed the complete Before-After-Control-Impact (BACI) methodology, which is a robust approach to assess the impacts of a disturbance (Supplementary material, Appendix 2, Table B4). Unburnt areas act as necessary points of comparison by establishing a baseline for evaluating the effects of multiple variables. Additionally, these baselines allow for cause-and-effect relationships due to fire disturbance to be identified. Therefore, it is imperative for researchers interested in studying the relationships between wildfire and the environment to consider including adjacent unburnt areas as controls in their methodological design. We recommend including a nearby, unburned area as a control area or obtaining pre-fire data when possible. The latter option is not always available due to the stochastic nature of wildfire events, making inclusion of a control area a more likely option.

#### *Fire severity levels*

Considering the variability in fire severity and the resulting changes in habitat structure within temperate forests, assessing fire

severity is essential for gaining a comprehensive understanding of its impact on the avifauna community. Out of the studies included in this review, 50% (26) employed a fire severity classification in their design, while half omitted this potentially critical information (see Supplementary material, Appendix 2, Table B4). These omissions risk over-simplifying the impacts of wildfire, as fire-induced changes to habitat avifauna populations can vary greatly due to burn severity. Thus, considering fire severity levels in studies can potentially lead to more effective conservation strategies and management practices.

#### *Statistical analyses*

Understanding the data analysis methodologies commonly employed in a particular field is essential for planning future studies. Supplementary material, Appendix 2, Table B5 summarises the statistical analyses used in the studies evaluated in this review. Supplementary material, Appendix 3, Table C1 lists statistical tests, models and post-hoc tests. Our review indicates a greater use of non-parametric models. While non-parametric models are best suited for non-normal data and small sample sizes, they can lack the power and precision of parametric models when underlying assumptions are met. Conversely, parametric models can offer more detailed insights but require assumptions about data distributions that may not always be satisfied. Most studies in this review utilised habitat and occupancy distribution models for data analysis.

Future studies should consider including additional variables and a control, such as data from unburned areas or data collected prior to wildfires, to generate a more reliable understanding of the impact of these disturbances, including their effects on habitat and occupancy distribution.

#### CONCLUSIONS

Our review of studies on the impacts of wildfires on avifauna in temperate forests reveals several key findings: 1) research in this field is dominated by a few countries, with the United States, Canada and Spain leading in the number of publications. International collaborations have been limited, highlighting the need for greater geographic diversity and more cross-border comparative studies. 2) The choice of statistical and sampling methodologies is fundamental. While current studies employ various statistical models, we strongly recommend using more robust approaches, such as the Before-After-Control-Impact (BACI) model, and methods that include unburned control areas. These approaches provide more accurate baseline data for assessing the direct and indirect effects of wildfires, ensuring the validity and reliability of research results. 3) It is essential to recognise that wildfires create a mosaic of disturbances of varying severity. Therefore, any study on wildfires should consider these levels of severity to generate a comprehensive understanding of the ecological processes involved. This approach will provide a more nuanced view of the impact of wildfires on avifauna in temperate forests.

With their rich biodiversity, temperate forests play an essential role in ecological processes at multiple scales. Wildfires, as a natural part of these ecosystems, induce environmental changes that can have cascading effects on ecological communities and the services these forests provide. It is imperative to study these effects, human interventions and the potential impacts of climate change in future scenarios.

Detailed knowledge of how wildfires affect avifauna in temperate forests should guide conservation efforts and the development of sustainable forest management strategies to enhance ecosystem resilience. In particular, this knowledge should inform the design of

fire management policies that protect biodiversity and the livelihoods of human communities that rely on forests, including their access to natural resources, economic stability and overall well-being. We recommend incorporating unburned reference areas in future studies, considering fire severity levels when planning bird censuses and species sampling, and conducting post-fire monitoring in the short and long term.

ACKNOWLEDGEMENTS.—We thank Dr. Horacio de la Cueva for his support and invaluable contributions, which were fundamental to conceptualising this review and clarifying our ideas, and Baja Working Group for support (small grant). We also acknowledge the invaluable contributions of María Fernanda Figueroa Avila in organising and refining the database. This study was supported by CONAHACYT [CVU: 938475].

AUTHOR CONTRIBUTIONS.—Conceptualization: DR (lead), GS (supporting), ZS (supporting); Data curation: DR (lead), GD (equal); Formal analysis: DR; Funding acquisition: HR (lead); Investigation: DR; Methodology: DR; Project administration: DR; Resources: DR; Software: DR; Supervision: DR(lead), GS (equal), GD (equal), MV (supporting), ZS (supporting); Validation: DR; Visualization: DR; Writing – original draft: DR (lead), GS (equal), MV (supporting); HR (supporting); Writing – review & editing: DR (lead), GS (equal), MV (supporting); HR (supporting); ZS (supporting).

## REFERENCES

- Aquilani, S.M.T. & LeBlanc, D. (2003). Breeding bird communities in burned and unburned sites in a mature indian oak forest. *Proceedings of the Indiana Academy of Science*, 112: 186-191.
- Bechtoldt, C.L. & Stouffer, P.C. (2005). Home-range size, response to fire, and habitat preferences of wintering Henslow's sparrows. *The Wilson Bulletin*, 117: 211-225.
- Bibby, C.J., Marsden, S. & Jones, M. (1998). Bird-habitat studies. In International BirdLife (Ed.): *Bird surveys: expedition field techniques*, pp. 99-114. Editorial Expedition Advisory Centre.
- Blake, J.G. (1982). Influence of fire and logging on nonbreeding bird communities of Ponderosa Pine Forests. *The Journal of Wildlife Management*, 46: 404.
- Bond, W. & Keeley, J. (2005). Fire as a global "herbivore": the ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution*, 20: 387-394.
- Bowman, D.M.J.S., Kolden, C.A., Abatzoglou, J.T., Johnston, F.H., Van Der Werf, G.R. & Flannigan, M. (2020). *Vegetation fires in the Anthropocene. Nature Reviews Earth & Environment*, 1: 500-515.
- Bowman, D.M.J.S., Balch, J.K., Artaxo, P., Bond, W.J., Carlson, J.M., Cochrane, M.A., D'Antonio, C.M., DeFries, R.S., Doyle, J.C., Harrison, S.P., Johnston, F.H., Keeley, J.E., Krawchuk, M.A., Kull, C.A., Marston, J.B., Moritz, M.A., Prentice, I.C., Roos, C.I., Scott, A.C., Swetnam, T.W., Van Der Werf, G.R. & Pyne, S.J. (2009). Fire in the Earth System. *Science*, 324(5926): 481-484.
- Brawn, J.D., Robinson, S.K. & Thompson Lii, F.R. (2001). The role of disturbance in the ecology and conservation of birds. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 32: 251-257.
- Brewer, C.K. (2005). Classifying and mapping wildfire severity: A comparison of methods. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 71: 1311-1320.
- Buckland, S.T. (2006). Point-transect surveys for songbirds: Robust methodologies. *The Auk*, 123: 345-357.
- Challenger, A. (1998). *Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México: Pasado, presente y futuro*. México, D.F.: CONABIO-UNAM-Sierra Madre.
- Choudhri, A.F., Siddiqui, A., Khan, N.R. & Cohen, H.L. (2015). Understanding Bibliometric Parameters and Analysis. *Radiographics*, 35: 736-746.
- Cobo, M.J., López-Herrera, A.G. & Herrera, F. (2011). An approach for detecting, quantifying, and visualizing the evolution of a research field: A practical application to the Fuzzy Sets Theory field. *Journal of Informetrics*, 5: 146-166.

- Cobo, M.J., López-Herrera, A.G., Herrera-Viedma, E. & Herrera, F. (2012). SciMAT: A new Science Mapping Analysis Software Tool. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 63: 1609-1630.
- CONABIO (2014). *Extensión y distribución de bosques templados. Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- Dale, V.H. & Beyeler, S.C. (2001). Challenges in the development and use of ecological indicators. *Ecological Indicators*, 1: 3-10.
- Driscoll, D.A., Armenteras, D., Bennett, A.F., Brotons, L., Clarke, M.F., Doherty, T.S., Haslem, A., Kelly, L.T., Sato, C.F., Sitters, H., Aquilué, N., Bell, K., Chadid, M., Duane, A., Meza-Elizalde, M.C., Giljohann, K.M., González, M.T., Jambhekar, R., Lazzari, J., Morán-Ordóñez, A. & Wevill, T. (2021). How fire interacts with habitat loss and fragmentation. *Biological Reviews*, 96: 976-998.
- Eidenshink, J., Schwind, B., Brewer, K., Zhu, Z., Quayle, B. & Howard, S. (2007). A project for monitoring trends in burn severity. *Fire ecology*, 3: 3-21.
- Eisenberg, C., Anderson, C.L., Collingwood, A., Sissons, R., Dunn, C.J., Meigs, G.W., Hibbs, D.E., Murphy, S., Kuiper, S.D., SpearChief-Morris, J., Little Bear, L., Johnston, B. & Edson, C.B. (2019). Out of the ashes: Ecological resilience to extreme wildfire, prescribed burns, and indigenous burning in ecosystems. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 7: 436.
- Eriksen, M.B. & Frandsen, T.F. (2018). The impact of patient, intervention, comparison, outcome (PICO) as a search strategy tool on literature search quality: a systematic review. *Journal of the Medical Library Association*, 106: 420-431.
- Flesch, A.D., Sánchez, C.G. & Amarillas, J.V. (2016). Abundance and habitat relationships of breeding birds in the Sky Islands and adjacent Sierra Madre Occidental of northwest Mexico. *Journal of Field Ornithology*, 87: 176-195.
- Fontaine, J.B., Donato, D.C., Robinson, W.D., Law, B.E. & Kauffman, J.B. (2009). Bird communities following high-severity fire: Response to single and repeat fires in a mixed-evergreen forest, Oregon, USA. *Forest Ecology and Management*, 257: 1496-1504.
- Fontaine, J.B. & Kennedy, P.L. (2012). Meta-analysis of avian and small-mammal response to fire severity and fire surrogate treatments in U.S. fire-prone forests. *Ecological Applications*, 22: 1547-1561.
- Francos, M. & Úbeda, X. (2021). Prescribed fire management. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 21: 100250.
- Germaine, H.L. & Germaine, S.S. (2002). Forest restoration treatment effects on the nesting success of Western Bluebirds (*Sialia mexicana*). *Restoration Ecology*, 10: 362-367.
- Gill, A.M., Bradstock, R.A. & Williams, J.E. (2002). Fire regimes and biodiversity: legacy and vision. *Flammable Australia. The fire regimes and biodiversity of a continent*, pp. 429-447. Editorial Cambridge University Press.
- Gill, A.M. & Allan, G. (2008). Large fires, fire effects and the fire-regime concept. *International Journal of Wildland Fire*, 17: 688.
- Glikson, A. (2013). Fire and human evolution: The deep-time blueprints of the Anthropocene. *Anthropocene*, 3: 89-92.
- González, T.M., González-Trujillo, J.D., Muñoz, A. & Armenteras, D. (2022). Effects of fire history on animal communities: a systematic review. *Ecological Processes*, 11: 11.
- He, T., Lamont, B.B. & Pausas, J.G. (2019). Fire as a key driver of Earth's biodiversity. *Biological Reviews*, 94: 1983-2010.
- Hessburg, P.F., Salter, R.B. & James, K.M. (2007). Re-examining fire severity relations in pre-management era mixed conifer forests: inferences from landscape patterns of forest structure. *Landscape Ecology*, 22(S1): 5-24.
- Hirsch, J.E. & Buela-Casal, G. (2014). The meaning of the h-index'. *International Journal of Clinical and Health Psychology*, 14: 161-164.
- Hutto, R.L. & Patterson, D.A. (2016). Positive effects of fire on birds may appear only under narrow combinations of fire severity and time-since-fire. *International Journal of Wildland Fire*, 25: 1074.
- Jolly, W.M., Cochrane, M.A., Freeborn, P.H., Holden, Z.A., Brown, T.J., Williamson, G.J. & Bowman, D.M.J.S. (2015). Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nature Communications*, 6: 7537.

- Jones, G.M. & Tingley, M.W. (2022). Pyrodiversity and biodiversity: A history, synthesis, and outlook. *Journal Diversity and Distributions*, 28: 386-403.
- Keane, R.E., Agee, J.K., Fulé, P., Keeley, J.E., Key, C., Kitchen, S.G., Miller, R. & Schulte, L.A. (2008). Ecological effects of large fires on US landscapes: benefit or catastrophe?. *International Journal of Wildland Fire*, 17: 696-712.
- Keane, R.E. & Karau, E. (2010). Evaluating the ecological benefits of wildfire by integrating fire and ecosystem simulation models. *Ecological Modelling*, 221: 1162-1172.
- Keeley, J.E., Fotheringham, C.J. & Morais, M. (1999). Reexamining fire suppression impacts on brushland fire regimes. *Science*, 284 (5421): 1829-32.
- Keeley, J.E. (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 18: 116.
- Kelly, L.T., Brotons, L. & McCarthy, M.A. (2017). Putting pyrodiversity to work for animal conservation. *Conservation Biology*, 31: 952-955.
- Kennedy, P.L. & Fontaine, J.B. (2009). Synthesis of knowledge on the effects of fire and fire surrogates on Wildlife in U.S. Dry Forests. Oregon State University Agricultural experiment station. *Special Report*, 1096: 133.
- Kotliar, N.B., Kennedy, P.L. & Ferree, K. (2007). Avifaunal responses to fire in Southwestern Montane Forests along a burn severity gradient. *Ecological Applications*, 17: 491-507.
- Kozlowski, T.T. & Ahlgren, C.E. (1974). *Fire and ecosystems*, pp. 542. Editorial Academic Press. INC.
- Landi, M.A., Di Bella, C., Ojeda, S., Salvatierra, P., Argañaraz, J. & Bellis, L.M. (2017). Selecting control sites for post-fire ecological studies using biological criteria and MODIS time series data. *Fire Ecology*, 13: 1-17.
- Lee, D.C. & Marsden, S.J. (2008). Adjusting count period strategies to improve the accuracy of forest bird abundance estimates from point transect distance sampling surveys. *Ibis*, 150: 315-325.
- Leidolf, A. & Bissonette, J.A. (2009). The effects of fire on avian communities: spatio-temporal attributes of the literature 1912-2003. *International Journal of Wildland Fire*, 18: 609.
- Lyon, L.J., Huff, M.H., Hooper, R.G., Telfer, E.S., Schreiner, D.S. & Smith, J.K. (2000). *Wildland fire in ecosystems effects of fire on fauna*. United States Department of Agriculture. General Technical Report RMRS-GTR-42- volume 1.
- Miller, J.D., Skinner, C.D., Safford, H.D., Knapp, E.E. & Ramirez, C.M. (2012). Trends and causes of severity, size, and number of fires in northwestern California, USA. *Ecological Applications*, 22: 184-203.
- Pastro, L.A., Dickman, C.R. & Letnic, M. (2014). Fire type and hemisphere determine the effects of fire on the alpha and beta diversity of vertebrates: a global meta-analysis: Fire and diversity meta-analysis. *Global Ecology and Biogeography*, 23: 1146-1156.
- Pausas, J.G. & Vallejo, R. (2008). Bases ecológicas para convivir con los incendios forestales en la Región Mediterránea: decálogo. *Ecosistemas*, 17: 128-129.
- Pausas, J.G. & Keeley, J.E. (2019). Wildfires as an ecosystem service. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 17: 289-295.
- Pérez-Granados, C. & Traba, J. (2021). Estimating bird density using passive acoustic monitoring: a review of methods and suggestions for further research. *Ibis*, 163: 765-783.
- Prodon, R. & Pons, P. (1993). Postfire bird studies: methods, questions, and perspectives. *Laboratoire Arago*, 332-343.
- Prowse, T.A.A., Collard, S.J., Blackwood, A., O'Connor, P.J., Delean, S., Barnes, M., Cassey, P. & Possingham, H.P. (2017). Prescribed burning impacts avian diversity and disadvantages woodland-specialist birds unless long-unburnt habitat is retained. *Biological Conservation*, 215: 268-276.
- Pyne, S.J. (2016). *California: a fire survey*. The University of Arizona Press.
- Ralph, C.J. & Scott, J.M. (1981). Estimating numbers of terrestrial birds. *Studies in Avian Biology*, 6: 1-2.
- Ralph, C.J., Geupel, G.R., Pyle, P., Martin, T.E. & DeSante, D.F. (1993). *Handbook of field methods for monitoring landbirds*. 41 p. Gen. Tech. Rep. PSWGTR-144. Albany, CA: Pacific Southwest Research Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture.

- Ralph, C.J., Droege, S. & Sauer, J.R. (1995). *Managing and monitoring birds using point counts: Standards and applications*. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-149.
- Richards, S.A., Possingham, H.P. & Tizard, J. (1999). Optimal fire management for maintaining community diversity. *Ecological Applications*, 9: 880-892.
- Rost, J., Jardel-Pelaez, E.J., Bas, J.M., Pons, P., Loera, J., Vargas-Jaramillo, S. & Santana, E. (2015). The role of frugivorous birds and bats in the colonization of cloud forest plant species in burned areas in western Mexico. *Animal Biodiversity and Conservation*, 38: 175-182.
- Rzedowski, J. (2006). *Libro Vegetación de México*, pp. 504. Editorial Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Saab, V.A. & Powell, H.D.W. (2005). Fire and avian ecology in North America. *Studies in Avian Biology*, 30: 1-13.
- Saab, V.A., Latif, Q.R., Block, W.M. & Dudley, J.G. (2022). Short-term benefits of prescribed fire to bird communities of dry forests. *Fire Ecology*, 18: 4.
- Schieck, J. & Song, S.J. (2006). Changes in bird communities throughout succession following fire and harvest in boreal forests of western North America: literature review and meta-analyses. *Canadian Journal of Forest Research*, 36: 1299-1318.
- Scott, A.C., Bowman, D.M.J.S., Bond, W.J., Pyne, S.J. & Alexander, M.E. (2014). *Fire on earth: an introduction*. Editorial John Wiley & Sons.
- Sedighi, M. (2016). Application of word co-occurrence analysis method in mapping of the scientific fields (case study: the field of Informetrics). *Library Reviews*, 65: 52-64.
- Silva, M. do S.T., Oliveira, V.M. de & Correia, S.É.N. (2022). Scientific mapping in Scopus with Biblioshiny: A bibliometric analysis of organizational tensions. *Revista Contemporânea de Economia e Gestão*, 20: 54-71.
- Sitters, H., York, A., Swan, M., Christie, F. & Di Stefano, J. (2016). Opposing responses of bird functional diversity to vegetation structural diversity in wet and dry forest. *PlosOne* 11(10): e0164917.
- Smucker, K.M., Hutto, R.L. & Steele, B.M. (2005). Changes in Bird Abundance After Wildfire: Importance of Fire Severity and Time Since Fire. *Ecological Applications*, 15(5): 1535-1549.
- Steel, Z.L., Miller, J.E.D., Ponisio, L.C., Tingley, M.W., Wilkin, K., Blakey, R., Hoffman, K.M. & Jonas, G. (2024). A roadmap for pyrodiversity science. *Journal of Biogeography*, 51(2): 280-293.
- Sutherland, W.J., Newton, I. & Green, R. (2004). Bird census and survey techniques. *Libro Bird Ecology and Conservation: A Handbook of Techniques*, pp. 17-52. Editorial Oxford University Press.
- Taluman, J.F. (2013). A comparison of fixed-width transects and fixed-radius point counts for breeding-bird surveys in a mixed hardwood forest. *Southeastern Naturalist*, 12: 457-477.
- Van Leeuwen, W.J.D., Casady, G.M., Neary, D.G., Bautista, S., Alloza, J.A., Carmel, Y., Wittenberg, L., Malkinson, D. & Orr, B.J. (2010). Monitoring post-wildfire vegetation response with remotely sensed time-series data in Spain, USA and Israel. *International Journal of Wildland Fire*, 19: 75.
- Visser, M., Van Eck, N.J. & Waltamn, L. (2021). Large-scale comparison of bibliographic data sources: Scopus, web of science, dimensions, Crossref, and Microsoft Academic. *Quantitative Science Studies*, 2: 20-41.
- Watson, D.M. (2003). The 'standardized search': An improved way to conduct bird surveys. *Australian Ecology*, 28: 515-525.
- Wheeldon, A., Mossman, H.L., Sullivan, M.J.P., Mathenge, J. & De Kort, S.R. (2019). Comparison of acoustic and traditional point count methods to assess bird diversity and composition in the Aberdare National Park, Kenya. *African Journal of Ecology*, 57: 168-176.
- Wilczewski, M. & Alon, I. (2022). Language and communication in international students' adaptation: a bibliometric and content analysis review. *Higher Education*, 85: 1235-1256.
- William, L.T. (2002). Towards reliable birds surveys: Accounting for individuals present but not detected. *The Auk*, 119: 18-25.
- Wilson, R.R., Twedt, D.J. & Elliot, A.B. (2000). Comparison of line transects and point counts for monitoring spring migration in forested wetlands. *Journal of Field Ornithology*, 71: 345-355.

## SUPPLEMENTARY ELECTRONIC MATERIAL

Additional supporting information may be found in the online version of this article. See volume 72(1) on [www.ardeola.org](http://www.ardeola.org)

[Información adicional sobre este artículo en su versión en línea en [www.ardeola.org](http://www.ardeola.org), volumen 72(1).]

## APPENDIX 1

**Table A1.** PICO Model. Strategy for compiling accurate information from the Web of Science database from studies on forest fires that impacted temperate forests and that employed birds as indicators of the effects of fire.

[Modelo PICO: Estrategia para recopilar información precisa de la base de datos Web of Science sobre estudios de incendios forestales que afectaron a bosques templados y utilizaron aves como indicadores de los efectos del fuego.]

**Table A2.** Parameters and search equation utilising the Web of Science database.

[Parámetros y ecuación de búsqueda utilizando la base de datos de Web of Science.]

**Table A3.** List of synonyms, grouping similar concepts.

[Lista de sinónimos, agrupados en conceptos similares.]

**Table B2.** Performance metrics for the scientific journals assessed in this review.

[Métricas de rendimiento de las revistas científicas evaluadas en esta revisión.]

**Table B3.** Key words frequencies in the studies included in this review.

[Frecuencias de palabras clave en los estudios incluidos en esta revisión.]

**Table B4.** Document attributes with their corresponding frequencies of occurrence in the final dataset of 52 documents.

[Los atributos de los documentos se presentan junto con sus frecuencias de ocurrencia

correspondientes en el conjunto final de datos que consta de 52 documentos.]

**Table B5.** Statistical analyses identified in the final dataset of 52 documents.

[Análisis estadísticos identificados en el conjunto final de datos compuesto por 52 documentos.]

## APPENDIX 2

**Table B1.** Significant findings have emerged from a comprehensive bibliometric analysis utilising data from Web of Science. This analysis encompasses 52 studies dedicated to investigating the impact of fire on avian communities within temperate forests.

[Hallazgos significativos de un análisis bibliométrico utilizando datos de Web of Science, que abarcan 52 estudios que investigan el impacto del fuego en las comunidades de aves en bosques templados.]

## APPENDIX 3

**Table C1.** This table provides a summary of pertinent information extracted from the reviewed documents pertaining to research focused on forest fires and their impacts on temperate forests, with birds serving as indicators of fire effects.

[Esta tabla resume la información relevante de los documentos revisados de la línea de investigación sobre incendios forestales que afectaron a bosques templados y utilizaron aves como indicadores de los efectos del fuego.]

Received: April 13, 2024

Major Revision: June 10, 2024

Accepted: October 12, 2024

Editor: Chiara Bettega

## CAPÍTULO II

### Los Incendios Forestales: ¿Promotores de la Biodiversidad? Un Estudio de Caso en el Parque Nacional "Sierra de San Pedro Mártir".

#### Resumen

Este estudio evalúa cómo la severidad del incendio y la estacionalidad influyen en la riqueza de aves en el Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir, 20 años después de un gran incendio ocurrido en 2003. Se seleccionaron sitios de muestreo representativos en áreas con diferentes niveles de severidad (muy alta, alta, media-baja y bosque), asegurando una adecuada cobertura espacial. Aunque las grabadoras *Song Meter Mini 2* (SM2) y SM3 presentan diferencias en sensibilidad, el análisis no evidenció que estas diferencias hayan influido de forma importante en la detección de individuos o especies durante el estudio. Las grabaciones fueron procesadas con el *software Raven Pro* y clasificadas con el modelo *BirdNet Global 6K*. La riqueza de especies se analizó mediante un modelo lineal generalizado con distribución binomial negativa, debido a la sobredispersión en los datos. Los resultados revelaron que tanto la severidad del incendio como la estación del año, y especialmente su interacción, influyen significativamente en la riqueza de aves. Se observó un aumento en la riqueza en áreas con severidad alta y muy alta, particularmente en primavera, lo que sugiere que ciertos niveles de perturbación pueden favorecer la diversidad, dependiendo del momento del año. Este estudio subraya la importancia de considerar tanto la magnitud de la perturbación como los factores estacionales en las estrategias de manejo y conservación en ecosistemas afectados por el fuego.

**Palabras clave:** Severidad del fuego, estacionalidad, riqueza de aves, monitoreo acústico, modelo lineal generalizado, avifauna post-incendio, perturbación ecológica, bosque de coníferas, Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir.

## Introducción

El fuego ha sido una perturbación ecológica presente desde los orígenes de muchos ecosistemas, influyendo en su estructura y función a lo largo del tiempo. En diversas regiones, ha desempeñado un papel clave como fuerza evolutiva, guiando la adaptación de la biota y creando gradientes de severidad que impactan en la biodiversidad (McKenzie *et al.*, 2011; Tinner *et al.*, 1999). Estos gradientes son fundamentales en la "Ecología del Fuego" (Agee, 1996; Burrows, 2008), ya que los efectos del fuego varían según su intensidad y extensión, lo que impacta las comunidades biológicas de diversas maneras.

Ecosistemas como los bosques de coníferas, sabanas de pino, pastizales, vegetación mediterránea, chaparrales y matorrales dependen del fuego para su regeneración y mantenimiento (Rundel, 1981). En particular, las regiones montañosas de Baja California —especialmente la Sierra de Juárez y la Sierra de San Pedro Mártir— presentan condiciones ecológicas, climáticas y florísticas muy similares a las de los sistemas montañosos del sur de California, en Estados Unidos (Minnich *et al.*, 2000; Rundel *et al.*, 1988). Esta similitud convierte a la región en un sistema natural comparativo clave para entender los efectos ecológicos del fuego en ecosistemas mediterráneos templados.

La alta diversidad biológica y la recurrencia natural de incendios en estas sierras hacen de ellas un escenario ideal para estudiar la interacción entre fuego y biodiversidad. Esta riqueza convierte a estos bosques en verdaderos laboratorios naturales para explorar los efectos del fuego sobre la fauna y la flora, siendo las aves un grupo particularmente relevante por su capacidad de respuesta a las perturbaciones.

Los resultados obtenidos coinciden con estudios realizados en bosques templados del sur de California, donde regímenes de fuego limitados por el combustible han mostrado un aumento en la severidad de los incendios debido a décadas de supresión del fuego (Steel *et al.*, 2015). Este fenómeno respalda la importancia de considerar la severidad como un indicador clave en la gestión adaptativa de estos ecosistemas (Parks *et al.*, 2015), tanto en México como en Estados Unidos.

Las aves son excelentes indicadores ecológicos debido a su sensibilidad a los cambios en el hábitat. Su presencia, abundancia y diversidad pueden proporcionar información valiosa sobre la calidad del ecosistema y los efectos de perturbaciones como los incendios forestales (Salas-Correa & Mancera-Rodríguez, 2020). Estas especies responden rápidamente a los cambios en la cadena alimentaria y a las alteraciones en su medio físico (SEO, 2013), lo que las convierte en herramientas efectivas para evaluar la salud de los ecosistemas.

Diversos estudios han demostrado que el fuego provoca cambios importantes en la diversidad y riqueza de aves a corto, mediano y largo plazo (Ponce *et al.*, 2012; Aguilera-Ortega, 2020). Dado que muchas especies de aves no son exclusivamente canoras, lo que dificulta su detección y puede requerir aumentar los días de muestreo, además de que algunas presentan cantos específicos durante la temporada de reproducción o por territorialidad, el monitoreo acústico emerge como una de las formas más efectivas para estudiar la avifauna en paisajes afectados por el fuego (Wood *et al.*, 2021; Reid *et al.*, 2022; Wood *et al.*, 2023). Connor Wood y colaboradores han demostrado la utilidad del monitoreo acústico para evaluar respuestas de aves a incendios en ecosistemas de California, validando esta metodología para estudios de diversidad y dinámica post-fuego (Wood *et al.*, 2023). Este método permite la identificación de especies a lo largo de las estaciones del año, incluso en áreas difíciles de acceder, como los bosques de topografía accidentada (Bartheld *et al.*, 2011). La implementación de grabadoras automáticas ofrece un diseño viable y constante, permitiendo realizar muestreos de forma discreta y eficiente.

Los bosques templados de la región, además de ser fundamentales para la fotosíntesis y como sumideros de CO<sup>2</sup>, también sirven como reservorios de flora y fauna, proporcionando múltiples servicios ecosistémicos (Granados-Sánchez *et al.*, 2004; Sáenz-Romero *et al.*, 2003). En México, los bosques templados cubren aproximadamente 32.8 millones de hectáreas, lo que representa el 16% del territorio nacional y alberga el 47% de las especies de pino a nivel mundial (Rodríguez-Trejo, 2003; Sáenz-Romero *et al.*, 2003). A pesar de la importancia ecológica del fuego en los bosques de coníferas, la relación entre el fuego y estos ecosistemas en la Sierra de San Pedro Mártir ha sido relativamente poco explorada, lo que limita las estrategias de manejo y conservación sostenibles (Moritz, 2014; Pausas & Keeley, 2019). Sin embargo, varios estudios

fundamentales han contribuido a esclarecer esta dinámica. Minnich *et al.* (2000) proporcionaron una base clave para entender los patrones espaciales y temporales del fuego en esta región mediterránea. Stephens *et al.* (2003) documentaron los primeros impactos de la supresión del fuego en los bosques mixtos de pino Jeffrey, resaltando cómo esta práctica ha alterado el régimen natural de incendios y la estructura forestal.

Rivera-Huerta *et al.* (2016) analizaron las tendencias y patrones de severidad y extensión del área quemada entre 1984 y 2010, aportando evidencia precisa sobre la variabilidad y los cambios en el régimen de fuego en la Sierra. Complementariamente, Stephens *et al.* (2010) investigaron la formación de cicatrices de fuego en los bosques mixtos, ayudando a reconstruir la historia de incendios mediante dendrocronología. Más recientemente, Stephens *et al.* (2024) profundizan en las dinámicas actuales y el manejo adaptativo en estos ecosistemas, destacando la importancia de integrar la historia del fuego con prácticas de conservación efectivas.

Estos estudios, junto con otros como Evett *et al.* (2007), permiten comprender mejor la compleja interacción entre el fuego y los bosques mediterráneos del noroeste de México, apoyando el desarrollo de estrategias de manejo basadas en el régimen histórico y actual del fuego.

La severidad del fuego, entendida como el grado de impacto de un incendio en la vegetación y el suelo, es un factor clave para determinar las respuestas de las comunidades de aves en ecosistemas forestales (Keeley, 2009; Helms, 1998). Numerosos estudios en bosques mixtos y coníferos de Alta California y regiones similares han evidenciado que diferentes grados de severidad generan patrones complejos y no lineales en la composición y diversidad aviar. Por ejemplo, la pyrodiversidad o diversidad de severidad y tiempo desde el incendio promueve una mayor diversidad de aves a lo largo del tiempo (Tingley *et al.*, 2016; Taillie *et al.*, 2018). Algunas especies especializadas, como el Carpintero de espalda negra (*Black-backed Woodpecker – Picoides arcticus*), dependen de las áreas de alta severidad con abundancia de madera muerta (Stephens *et al.*, 2019; Steel *et al.*, 2022). Estudios recientes han documentado que esta especie selecciona de forma preferente parches quemados severamente durante los primeros años post-incendio debido a la alta disponibilidad de insectos xilófagos, y que su

dispersión natal es limitada, lo que hace esencial mantener la conectividad entre hábitats adecuados (Stillman *et al.*, 2021; Stillman *et al.*, 2019). Además, la incorporación de la pyrodiversidad en la planificación y las evaluaciones rápidas post-fuego puede favorecer la conservación de su hábitat, mientras que prácticas como la remoción de madera muerta pueden reducir drásticamente su idoneidad (Stillman *et al.*, 2023). Sin embargo, la composición y respuesta aviar pueden variar según la historia del fuego y el régimen particular del área estudiada (Wood *et al.*, 2024; Steel *et al.*, 2023). Esta evidencia resalta la importancia de considerar tanto la severidad del fuego como la heterogeneidad espacial y temporal para diseñar planes de manejo forestal que favorezcan la conservación de la biodiversidad en paisajes post-incendio.

Diversos estudios en ecosistemas forestales de Alta California, similares a los del Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir (PNSSPM), han documentado cómo los incendios forestales influyen de manera compleja pero significativa en la diversidad de aves. En estos bosques mixtos de coníferas, el fuego de severidad mixta genera un mosaico de hábitats que beneficia a una amplia variedad de especies. Por ejemplo, Tingley *et al.* (2016) encontraron que la pirodiversidad —la variación espacial en la intensidad del fuego— promueve una mayor diversidad aviar a lo largo de una década. Taillie *et al.* (2018) demostraron que las respuestas de las aves no son lineales, y que tanto la severidad como el tiempo transcurrido desde el fuego influyen en la composición de las comunidades. Sin embargo, otros autores como Steel *et al.* (2022) y White *et al.* (2016) advierten que incendios muy grandes o homogéneamente severos pueden reducir la riqueza de especies y simplificar la estructura comunitaria, lo que destaca la importancia del tamaño y la configuración de los parches quemados. En este contexto, la gestión del fuego con criterios ecológicos —como proponen Stephens *et al.* (2019)— permite integrar las necesidades de conservación de especies sensibles con las prácticas de manejo forestal.

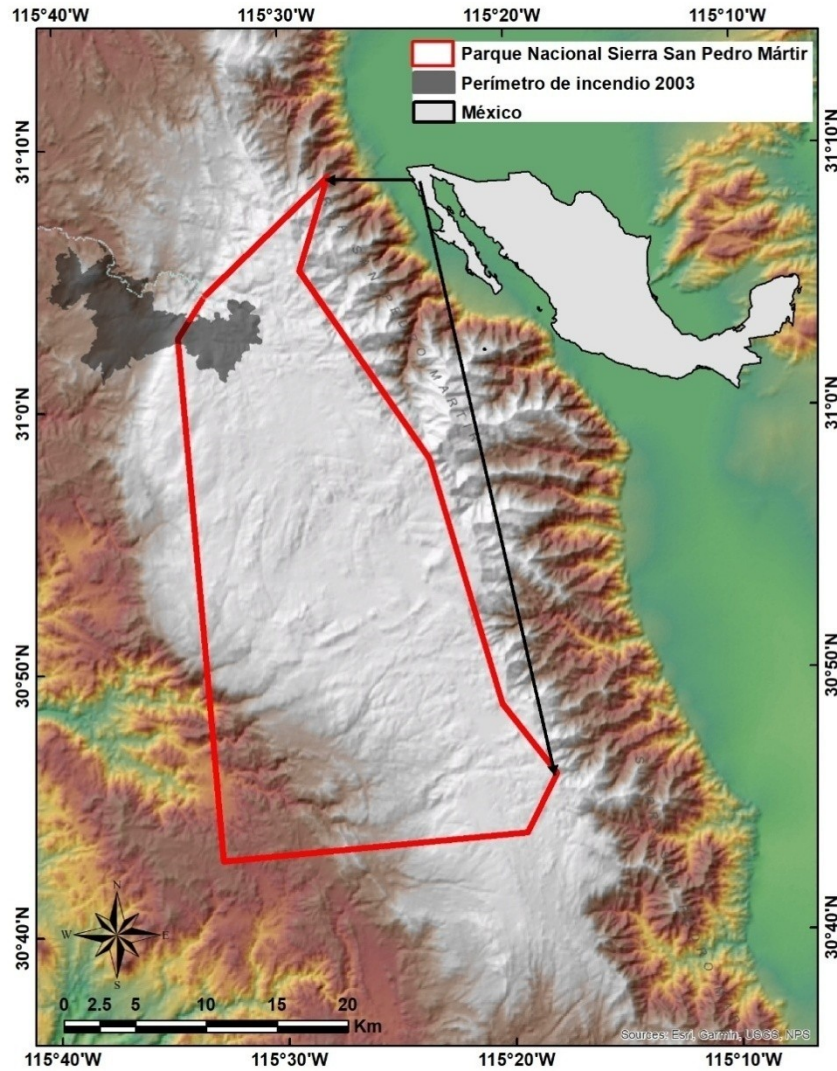
Además de Alta California, investigaciones en el suroeste de Estados Unidos, especialmente en regiones montañosas de Arizona y Nuevo México, han encontrado patrones similares. Estos paisajes también albergan bosques de pino ponderosa y mixtos de coníferas que han evolucionado con incendios frecuentes de baja a moderada intensidad. En estos sistemas, se ha observado que especies como el búho manchado mexicano (*Mexican Spotted Owl-Strix*

*occidentalis lucida*) y el pájaro carpintero bellotero (*Acorn Woodpecker - Melanerpes formicivorus*) dependen de condiciones estructurales generadas por incendios pasados. La literatura sugiere que la exclusión prolongada del fuego altera drásticamente el hábitat de estas aves, mientras que el uso controlado del fuego o el manejo basado en regímenes históricos puede favorecer su conservación (e.g., Ganey *et al.*, incluido en Stephens *et al.*, 2019). Estos hallazgos refuerzan la idea de que los efectos del fuego sobre las aves son contextuales, dependientes del régimen histórico de perturbación, la topografía y la historia de manejo, pero que en general, el fuego —cuando ocurre bajo regímenes ecológicamente apropiados— puede ser una herramienta clave para conservar la biodiversidad en bosques templados de coníferas.

Este estudio tiene como objetivo evaluar los cambios en la avifauna en el bosque templado del PNSSPM tras el incendio forestal de 2003. Utilizando a las aves como indicadores ecológicos de la diversidad en áreas quemadas a diferentes niveles de severidad del fuego, se pretende establecer una metodología replicable de monitoreo acústico para futuras investigaciones en ecosistemas donde el fuego es un proceso ecológico fundamental.

### **Área de estudio**

El PNSSPM es un sistema de alta montaña ubicado en el estado de Baja California que abarca una superficie de 72,910.68 hectáreas (CONANP). En sus zonas más elevadas predominan bosques de coníferas de clima templado seco, con una fisonomía y composición florística comparable a los bosques montanos del sur de California en Estados Unidos (Minnich *et al.*, 2000; Rundel *et al.*, 1988). Esta similitud se debe tanto al origen geológico granítico compartido como a las condiciones climáticas mediterráneas que caracterizan la región. La figura 1 muestra la ubicación geográfica del Parque Nacional dentro de la península de Baja California, así como el polígono que delimita su extensión como área natural protegida.



**Figura 1.** Perímetro de incendio del 2003 dentro del Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir en Baja California, México. Elaboración propia con base en datos de CONANP (2024).

Diversos estudios han señalado que estos bosques mantienen una estructura forestal relativamente intacta, con baja incidencia de alteraciones humanas, lo que ha permitido conservar dinámicas ecológicas históricas como la ocurrencia frecuente de incendios de baja a severidad mixta (Minnich *et al.*, 1983; Stephens, 2004; Stephens y Ruth, 2005; Skinner *et al.*, 2008; Rivera-Huerta *et al.*, 2016). Esta condición convierte al área en un laboratorio natural ideal para estudiar los efectos ecológicos del fuego en ecosistemas mediterráneos templados.

Investigaciones dendrocronológicas indican que, entre 1521 y 1980, los incendios ocurrieron con una frecuencia media de menos de 15 años, reflejando un régimen natural de

fuego frecuente en estos bosques (Stephens *et al.*, 2003). Además, al no haber sido sometidos a tala intensiva ni a una supresión sistemática del fuego como en muchas regiones del suroeste de Estados Unidos, los bosques del parque han conservado características estructurales similares a los paisajes de referencia previos al manejo intensivo en California (Stephens *et al.*, 2015).

Entre 1984 y 2010 se registraron 32 incendios dentro del Parque Nacional, afectando un total de 26,529 hectáreas, de las cuales aproximadamente 1,993 correspondieron a bosques de coníferas mixtas y de pino amarillo (Rivera-Huerta *et al.*, 2016). Aunque la severidad general de estos eventos fue baja, se detectó un aumento en el tamaño promedio de los parches de alta severidad (media de 2.9 ha, mediana de 0.63 ha), lo que sugiere que la acumulación de combustibles podría estar favoreciendo condiciones más propensas a incendios intensos, especialmente bajo escenarios de cambio climático.

Los bosques del parque se distribuyen desde los 1,500 hasta los 3,100 metros sobre el nivel del mar, donde se encuentra el Picacho del Diablo, el pico más alto de la península de Baja California. En el sector norte del parque, a más de 2,500 metros de altitud, se llevó a cabo el presente estudio, en una zona afectada por un incendio forestal ocurrido en 2003. Esta área se caracteriza por la presencia de bosques abiertos dominados por pino Jeffrey (*Pinus jeffreyi*), con una densidad arbórea baja (140 a 160 árboles por ha) que permite la visibilidad del suelo, escaso sotobosque y una mezcla de especies herbáceas (Minnich *et al.*, 1983; Rivera-Huerta 2017; Dunbar & Safford 2016). Estas condiciones estructurales son consistentes con lo descrito para los bosques montanos de la Sierra de San Pedro Mártir, donde se ha documentado una alta heterogeneidad espacial, baja intervención humana y un régimen histórico de incendios frecuentes de baja a moderada severidad (Stephens, 2004; Stephens & Gill, 2005; Stephens *et al.*, 2003; Rivera-Huerta *et al.*, 2016). Esta configuración favorece la infiltración de agua durante la temporada invernal y convierte al sitio en un entorno propicio para evaluar la influencia del fuego sobre la biodiversidad y la estructura del ecosistema. La figura 2 muestra una panorámica del paisaje típico en esta zona norte del parque, ilustrando las condiciones ambientales predominantes en el área de estudio.



**Figura 2.** Panorámica del paisaje en la zona norte del Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir, área afectada por un incendio forestal en julio de 2003. La fotografía ilustra un bosque abierto de coníferas — principalmente pino Jeffrey y otras especies mezcladas— con una estructura espacial heterogénea, troncos dispersos y sotobosque escaso mezclado con herbáceas.

En respuesta a estas condiciones ecológicas y como parte del fortalecimiento de su conservación, en 2009 se publicó un Programa de Manejo cuyo objetivo es preservar los elementos naturales del ecosistema a largo plazo, en beneficio de la sociedad mexicana, del estado de Baja California y de las comunidades locales (CONANP, 2015). Posteriormente, en 2020 se implementó un Programa de Manejo Integral del Fuego, diseñado para reducir la vulnerabilidad del parque ante los efectos del cambio climático. Este programa contempla acciones antes, durante y después de los incendios forestales, brindando un marco estratégico tanto para la gestión del fuego como para su estudio.

En este contexto, la presente investigación contribuye al entendimiento de los efectos del fuego en la avifauna, alineándose con los objetivos de conservación y manejo sostenible del PNSSPM.

### *Premisa*

“Se sabe que los incendios forestales favorecen la diversidad de la vegetación dependiente del fuego, y dado que en términos prácticos no es posible conocer toda la diversidad biológica de un territorio, se puede recurrir a un grupo biológico representativo de la misma que funcione como indicador ecológico; como es la avifauna, los mamíferos y la vegetación en los bosques mixtos de coníferas como los presentes en PNSSPM(CONANP, 2024)”. Basados en esto se crea la siguiente pregunta:

### *Pregunta principal:*

¿Cuál es la relación entre las características del incendio forestal y la riqueza de aves en el PNSSPM?

### *Hipótesis:*

La riqueza de aves varía significativamente según la severidad del incendio forestal y la estación del año, siendo mayor en áreas de alta severidad y en primavera, debido a una mayor disponibilidad de recursos y heterogeneidad estructural.

## **Objetivos**

### *General*

Evaluar cómo la severidad del incendio forestal y la estacionalidad afectan la riqueza de aves en el bosque de coníferas del PNSSPM.

### *Particulares*

- Comparar la riqueza de aves entre áreas con diferentes categorías de severidad del incendio (muy alta, alta, media-baja y no quemado).
- Analizar la variación estacional en la riqueza de aves en las diferentes categorías de severidad del incendio.
- Identificar patrones generales de respuesta de la riqueza de aves según la interacción entre severidad del fuego y estación del año.

## Metodología

### *Diseño del muestreo*

La recopilación de datos se llevó a cabo entre marzo de 2023 y octubre de 2024. Para este estudio, se utilizaron categorías de severidad del fuego basadas en los umbrales propuestos por Rivera-Huerta (2016), quien clasificó la severidad mediante el cambio porcentual en el área basal (BA) de árboles vivos, una métrica comúnmente asociada con la mortalidad arbórea. Esta metodología fue seleccionada por su correspondencia con métodos de muestreo forestal estandarizados y por su consistencia con estudios previos en ecosistemas de coníferas, como los de Miller *et al.* (2009b), que validaron rangos de severidad usando el índice RdNBR. La tabla I muestra las clases de severidad utilizadas en este estudio, sus umbrales en BA y sus valores aproximados de RdNBR.

**Tabla I.** Clases de severidad del fuego según el cambio porcentual en área basal (BA) de árboles vivos, con valores aproximados de RdNBR, basadas en Rivera-Huerta (2016) y Miller *et al.* (2009b).

<b>Severidad</b>	<b>Umbral de cambio en área basal (%) (Rivera-Huerta, 2016)</b>	<b>RdNBR aproximado</b>
Muy alta	$\geq 90 \%$	$\geq 652$
Alta	$\geq 25 \%$ y $< 90 \%$	370 – 652
Media	$> 0 \%$ y $< 25 \%$	167 – 370
Baja	$> 0 \%$ y $< 25 \%$	167 – 370
Bosque	0 %	$< 167$

El análisis se enfocó en la cicatriz del incendio ocurrido en 2003, con una superficie total estimada de 4,000 ha. De esta área, aproximadamente 546 ha se localizan dentro del sector norte del PNSSPM. A partir del mosaico de severidad generado por Rivera-Huerta *et al.* (2016), se preseleccionaron sitios de muestreo en función de las categorías de severidad detectadas en ese sector.

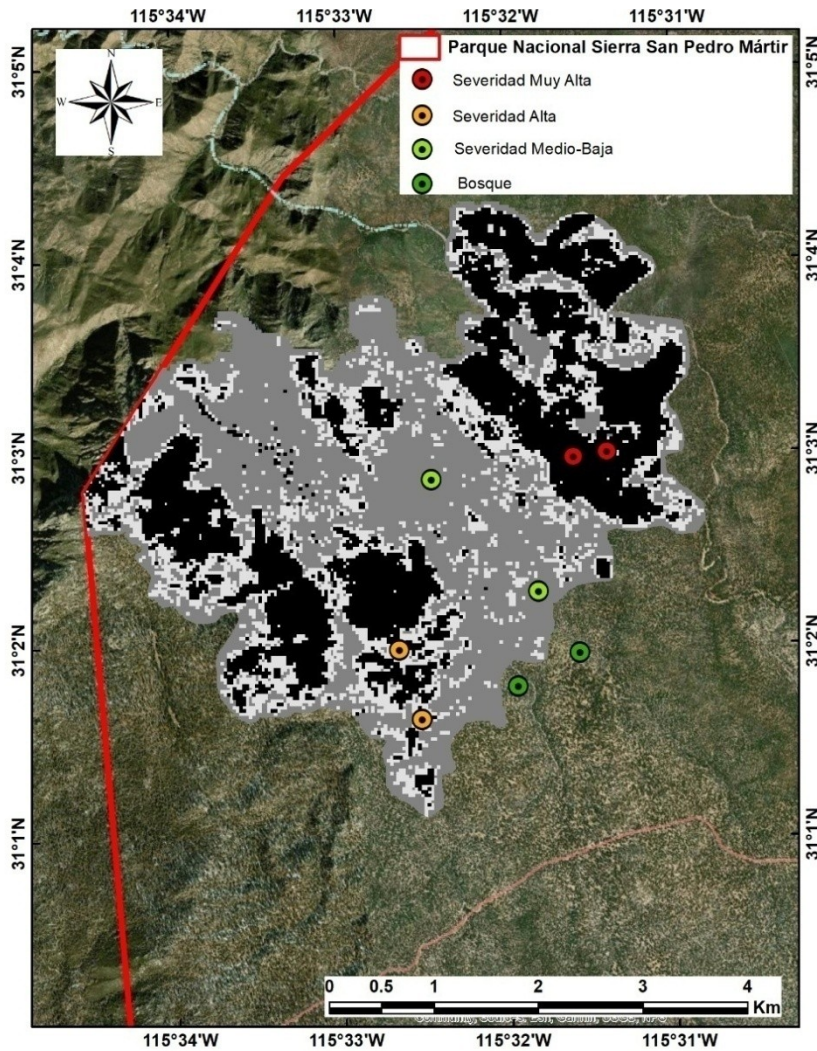
Posteriormente, se realizaron visitas de campo para verificar la accesibilidad y adecuación de los sitios, priorizando la representación del hábitat y la cobertura forestal original.

Se establecieron finalmente ocho sitios de muestreo: seis dentro del área afectada por el incendio y dos en bosque adyacente no quemado, ubicados a una distancia mínima de 500 m respecto al perímetro de la cicatriz.

Para facilitar la interpretación ecológica, las categorías “media” y “baja” fueron unificadas bajo la denominación “media-baja”, ya que, después de 20 años del evento de fuego, no se observaron diferencias estructurales o funcionales claras entre ambas. Estudios previos también sugieren que, con el tiempo, las diferencias entre estas clases pueden volverse indistinguibles (Keeley, 2009; Hessburg *et al.*, 2007; Keeley *et al.*, 2019; Stephens *et al.*, 2015).

Cada clase de severidad incluyó dos sitios de muestreo: muy alta, alta, media-baja y no quemado. En todos los casos, se garantizó un área mínima representativa de 150 m<sup>2</sup> alrededor de la coordenada central asignada a cada sitio, dentro de la categoría correspondiente de severidad. Además, los sitios dentro de una misma categoría fueron espaciados al menos 250 m entre sí, siguiendo recomendaciones de diseño ecológico para evitar pseudoreplicación y maximizar la independencia espacial de las muestras (Mueller-Dombois & Ellenberg, 1974; Kent, 2012).

Las coordenadas geográficas de los sitios de muestreo fueron las siguientes: para severidad muy alta, sitio 1 en 31°02'58.5"N, 115°31'36.0"W y sitio 2 en 31°02'59.99"N, 115°31'23.82"W; para severidad alta, sitio 1 en 31°01'37.2"N, 115°32'31.7"W y sitio 2 en 31°01'58.86"N, 115°32'39.56"W; para severidad media-baja, sitio 1 en 31°02'16.6"N, 115°31'49.0"W y sitio 2 en 31°02'51.68"N, 115°32'27.16"W; y para bosque, sitio 1 en 31°01'47.3"N, 115°31'56.7"W y sitio 2 en 31°01'57.48"N, 115°31'34.34"W. La figura 3 muestra el mapa de severidad del incendio del año 2003 dentro del parque, incluyendo el perímetro de la cicatriz y las categorías de severidad utilizadas y la ubicación georeferenciada de los sitios de muestreo seleccionados dentro de cada categoría.



**Figura 3.** Sector norte del Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir que muestran el perímetro de la cicatriz del incendio, las categorías de severidad utilizadas para el diseño del muestreo, y la localización de los ocho sitios seleccionados en este estudio.

#### *Descripción general del entorno en los sitios de muestreo*

Las características estructurales y florísticas de la vegetación difieren notablemente entre las categorías de severidad evaluadas, reflejando el legado del incendio de 2003 y los procesos de sucesión ecológica post-fuego. Aunque la composición del sotobosque es en general similar entre sitios quemados y no quemados —con presencia de especies comunes como *Lupinus sp.*, *Penstemon sp.*, *Salvia mellifera*, entre otras—, se observaron diferencias claras en la estructura del estrato arbóreo y la densidad del sotobosque.

En los sitios clasificados como de muy alta severidad, la vegetación muestra una pérdida total del dosel arbóreo. Estos sitios están dominados por arbustos maduros con rebrote activo alrededor de los esqueletos de árboles muertos, vegetación herbácea densa y abundantes tocones. En los sitios de alta severidad, la estructura arbórea se reduce a esqueletos en pie, algunos con acículas amarillas o señales de rebrote. La cobertura arbustiva incluye especies como *Ceanothus spinosus*, mientras que la cobertura herbácea es escasa.

Los sitios de severidad media-baja conservan parte del dosel original, con mezcla de árboles adultos sobrevivientes y regeneración arbórea. Es visible la cicatriz del fuego en la base de los troncos, lo que evidencia la presencia de fuego de baja intensidad a nivel del suelo. El sotobosque es más denso, con regeneración principalmente arbustiva. Finalmente, los sitios no quemados presentan un dosel maduro y cerrado, dominado por coníferas de gran porte como *Pinus jeffreyi* y *Abies concolor*, y una cobertura herbácea limitada.

**Tabla II.** Imágenes representativas del paisaje en cada categoría de severidad del fuego, que ilustran diferencias en composición, cobertura y estructura vegetal observadas en campo.

Categoría de severidad	Estrato arbóreo	Estrato arbustivo y herbáceo	Otros elementos notables
Muy alta	Ausente. Árboles muertos en pie (esqueletos) o tocones.	Arbustos maduros con rebrote abundante. Herbáceas densas ( <i>Lupinus, Salvia, Penstemon</i> ).	Alto grado de apertura. Suelo cubierto de vegetación secundaria.
Alta	Presencia de esqueletos de árboles; muchos con acículas amarillas o rebrote.	Menor cobertura que en "muy alta". Presencia de <i>Ceanothus spinosus</i> .	Evidencia de mortalidad arbórea reciente. Poco sotobosque.
Media-baja	Dosel parcial conservado. Árboles sobrevivientes con cicatriz basal.	Sotobosque denso, regeneración arbustiva.	Evidencia clara de paso del fuego a nivel del suelo.
Bosque	Dosel maduro y continuo. Árboles grandes, típicos del bosque de coníferas ( <i>Pinus jeffreyi, Abies concolor</i> ).	Escasa cobertura de herbáceas. Escaso desarrollo arbustivo.	Condición estructural intacta. Hábitat maduro.



Muy alta



Alta



Media-baja



Bosque

Estas diferencias estructurales proporcionan un gradiente ecológico claro entre los sitios, el cual fue fundamental para evaluar la respuesta de las comunidades de aves a diferentes niveles de perturbación. La tabla II muestra imágenes representativas del paisaje en cada categoría de severidad, ilustrando visualmente las diferencias en composición, cobertura y estructura vegetal observadas durante el trabajo de campo.

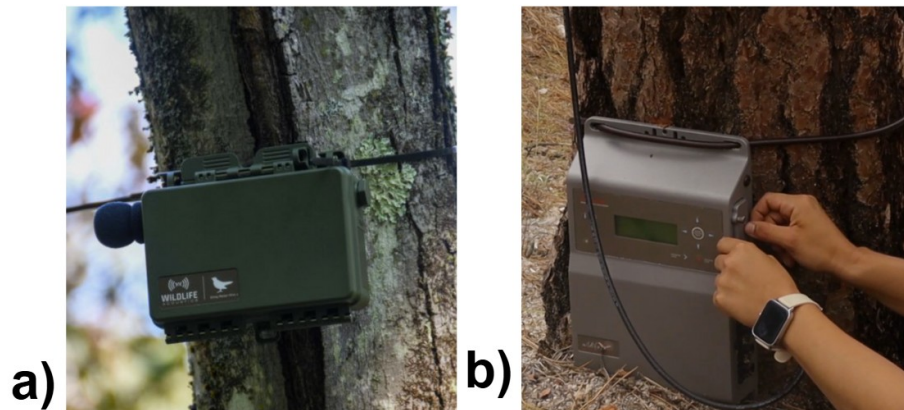
### *Recolección de Datos Acústicos*

Para la recolección de datos acústicos se utilizaron dos modelos de grabadoras autónomas de la marca *Wildlife Acoustics: Song Meter 3 (SM3)* y *Song Meter Mini 2 (MM2)* (Figura 4a y b). Ambas fueron instaladas siguiendo el mismo protocolo: los micrófonos se colocaron a una altura

de entre 1.3 y 1.5 metros sobre el suelo, sujetos a árboles y orientados horizontalmente, y se programaron para grabar simultáneamente durante cuatro horas diarias (de 5:00 a 9:00 AM) en varios días de cada estación del año: primavera, verano, otoño e invierno (Gallina & López-González, 2011; Vold *et al.*, 2017). Las SM3 fueron equipadas con dos micrófonos omnidireccionales externos (20 Hz – 20 kHz), mientras que las MM2 contaban con un micrófono ya integrado.

La asignación de grabadoras por sitio fue la siguiente: en la categoría de severidad muy alta, el sitio 1 fue monitoreado con una SM3 y el sitio 2 con una MM2; en la categoría de alta severidad, ambos sitios fueron monitoreados con SM3; en la categoría media-baja, ambos sitios utilizaron MM2, al igual que los dos sitios del bosque.

Cabe señalar que, aunque el protocolo de grabación fue idéntico para todos los equipos, la duración total de días grabados varió entre unidades debido a diferencias en la duración de las baterías, aspecto que se detalla en la sección de resultados.



**Figura 4.** Grabadoras acústicas autónomas utilizadas para la recolección de datos de campo. (a) *Song Meter Mini 2* y (b) *Song Meter SM3*, ambos modelos de la marca *Wildlife Acoustics*. Estos dispositivos permiten el monitoreo pasivo de la avifauna mediante grabaciones programadas en ambientes naturales.

### **Análisis de Datos**

Las grabaciones obtenidas fueron inicialmente revisadas y analizadas con el software *Raven Pro 1.6*, donde se evaluó la calidad de los archivos *WAV*, se identificaron interferencias y se delimitó

la duración efectiva de las grabaciones utilizables. Esta etapa permitió asegurar que sólo se procesaran audios con información clara y relevante para el estudio.

Posteriormente, las grabaciones sin interferencias fueron sometidas a un análisis automático mediante el modelo *BirdNET Global 6K* (Kahl *et al.*, 2021), un sistema de reconocimiento automático de vocalizaciones de aves que utiliza archivos de audio crudos (.WAV). Este modelo fue seleccionado por su entrenamiento global y su capacidad para identificar múltiples especies en diferentes paisajes sonoros.

Para maximizar la detección de especies, especialmente en un ambiente acústico complejo como el bosque de coníferas muestreado, se empleó un umbral de confianza del 35%. Aunque valores más altos (80-90%) reducen falsos positivos, también disminuyen considerablemente la detección total, sobre todo en grabaciones con baja relación señal-ruido, donde los sonidos débiles se mezclan con ruido ambiental. La elección de este umbral se fundamenta en consideraciones metodológicas y ecológicas, ya que en este tipo de hábitat muchas especies son poco vocales y presentan cantos esporádicos o enmascarados por el ruido ambiental (Kahl *et al.*, 2021; Priyadarshani *et al.*, 2022). Un umbral bajo permite captar una mayor riqueza acústica, confiando en filtros posteriores para minimizar posibles errores.

El producto final del análisis automático consistió en archivos de texto con los tiempos de detección de vocalizaciones, la identificación probable de la especie y el intervalo de confianza asignado por *BirdNET*.

Para garantizar la precisión de los resultados, se realizó una depuración manual focalizada y contextualizada. Aunque en el PNSSPM se registran especies acuáticas en zonas de encharcamiento al sur del parque, el área muestreada corresponde al sector norte, lo que permitió descartar estos registros. Además, se verificaron cuidadosamente las detecciones de especies raras o poco comunes para la región, revisando directamente los archivos de audio en *Raven Pro*. En varios casos, estas detecciones fueron identificadas como falsos positivos y eliminados, equilibrando así la eficiencia del análisis con la precisión en la caracterización de la comunidad de aves local.

## *Exploración de Datos y Selección del Modelo Estadístico*

### *1. Exploración de datos*

Para analizar la riqueza de aves, inicialmente se realizó una exploración descriptiva de los datos. La variable respuesta, riqueza de especies, corresponde a un conteo discreto, por lo que se evaluaron la media y la varianza para determinar la adecuación de modelos basados en distribuciones de conteo. Se observó que la varianza (91.23) fue considerablemente mayor que la media (15.11), lo que indica presencia de sobredispersión. Esta característica es común en datos ecológicos de conteo debido a fenómenos como agregación de individuos o heterogeneidad ambiental (Jakub *et al.*, 2018). Para evaluar la distribución de los datos, se ajustó un modelo de *Poisson* y se realizó una prueba de bondad de ajuste (Kolmogorov-Smirnov), la cual sugirió que el modelo *Poisson* no era adecuado debido a la sobredispersión. Por ello, se optó por ajustar modelos con distribución binomial negativa, que incluyen un parámetro adicional para modelar la varianza de forma más flexible (Bliss & Fisher, 1953; Navarro *et al.*, 2001).

### *2. Definición de unidades muestrales y agrupación de datos*

Para el análisis se seleccionaron dos sitios representativos por categoría de severidad del incendio (muy alta, alta, media-baja y no quemado). Las grabaciones acústicas de estos sitios fueron agrupadas por estación del año (primavera, verano, otoño e invierno), unificando los datos de ambos sitios por categoría y estación, y considerando solo la presencia o ausencia de especies sin contabilizar la frecuencia de detección ni los días individuales. De esta manera, se generó un inventario combinado de especies para cada combinación severidad  $\times$  estación, resultando en 16 observaciones independientes (4 categorías de severidad  $\times$  4 estaciones). Esta estrategia permitió aumentar la probabilidad de detección de especies poco vocales o esporádicas, mitigando parcialmente el sesgo por detectabilidad imperfecta presente en grabaciones puntuales (MacKenzie *et al.*, 2002). Sin embargo, esta agrupación asume que todas las especies presentes en la combinación severidad-estación fueron detectadas, limitación importante a considerar en la interpretación de resultados.

### *3. Modelación estadística*

Para evaluar la relación entre la riqueza de aves y las categorías de severidad y estación, se utilizó un modelo lineal generalizado con distribución binomial negativa (MLGbn), dado que

este modelo es apropiado para datos de conteo con sobredispersión. La variable respuesta fue la riqueza de especies por combinación severidad  $\times$  estación, y los predictores fueron las variables categóricas severidad del incendio (muy alta, alta, media-baja, no quemado) y estación del año (primavera, verano, otoño, invierno). Se incluyó la interacción entre ambos predictores para evaluar si el efecto de la severidad variaba según la estación.

La bondad de ajuste del modelo se evaluó mediante el test de razón de verosimilitudes, comparando el modelo completo con un modelo nulo sin predictores. Además, se examinaron criterios de información (AIC) y residuales para validar el ajuste. Debido a que los coeficientes estimados por el MLGbn se encuentran en la escala logarítmica, para facilitar la interpretación ecológica se aplicó la transformación exponencial a los coeficientes estimados, obteniendo así la riqueza esperada para cada categoría y los incrementos porcentuales relativos respecto a la categoría base (no quemado). Esta transformación permite interpretar los coeficientes como multiplicadores de la riqueza esperada, facilitando la comunicación de los efectos de severidad y estación en términos intuitivos y comparables (Agresti, 2013).

#### *4. Análisis de contrastes para comparaciones específicas*

Para evaluar diferencias estacionales dentro de cada nivel de severidad del fuego, se realizaron análisis de contrastes basados en estimaciones marginales con el paquete *emmeans* en R. Debido a que los coeficientes del MLGbn se expresan en escala logarítmica, se aplicó la transformación exponencial para obtener cambios relativos (porcentuales) en la riqueza esperada. La estación otoño fue excluida de este análisis por falta de datos en algunas categorías de severidad.

## Resultados

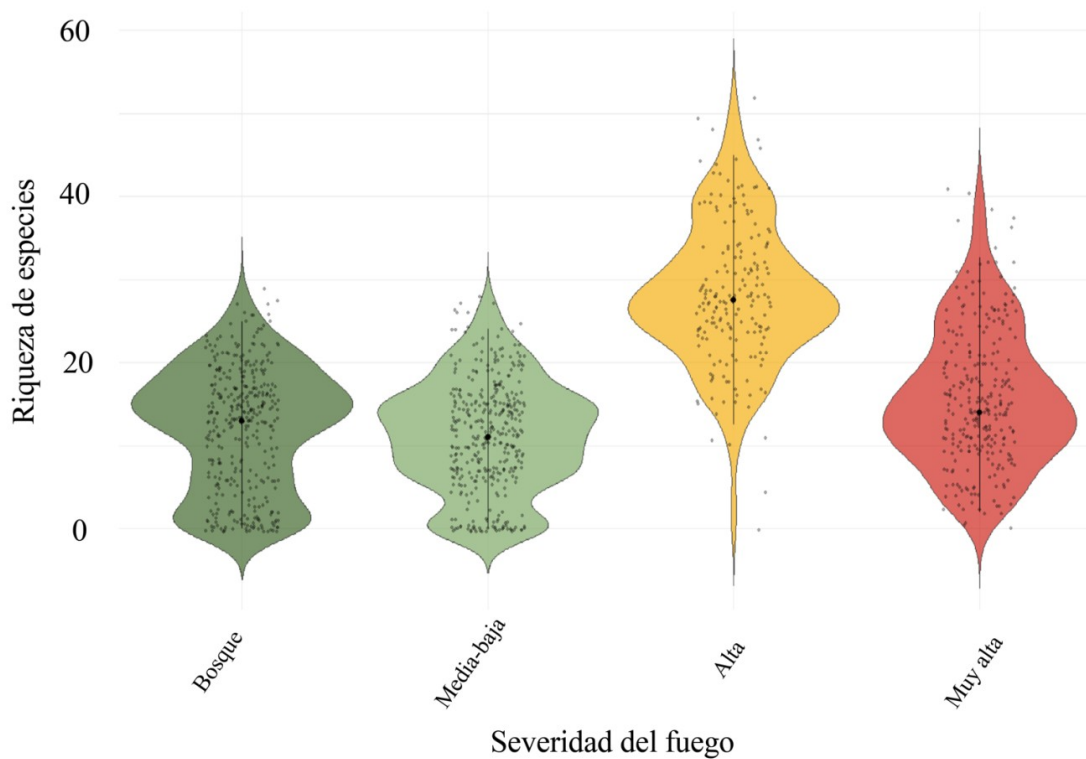
Durante el estudio se recopilaron un total de 516 audios distribuidos a lo largo de 471 días de muestreo, sumando aproximadamente 1,884 horas de grabación acústica. A partir de este esfuerzo, se analizaron 432,160 cantos de aves, lo que permitió detectar 184 especies diferentes, de las cuales 28 fueron posteriormente identificadas como falsos positivos dando un total de 156 especies de aves.

El esfuerzo de muestreo se distribuyó entre cuatro categorías de severidad del fuego: severidad alta (182 días), muy alta (106 días), media-baja (92 días) y bosque (91 días). La cantidad total de especies detectadas varió según la severidad, siendo mayor en las zonas con mayor perturbación: se registraron 170 especies en áreas de severidad muy alta, 153 en alta, y 127 tanto en media-baja como en bosque.

En cuanto a la distribución estacional, se detectaron 91 especies en invierno, 162 en otoño, 145 en primavera y 178 en verano. Sin embargo, no todas las combinaciones entre severidad y estación pudieron ser muestreadas: no se obtuvieron registros en otoño para las categorías de bosque ni media-baja, ni en invierno para la severidad muy alta.

El inventario completo de especies detectadas, junto con la severidad del fuego y la estación en la que se registraron, se presenta en la Tabla A1 (Anexos). Este amplio y detallado esfuerzo de muestreo proporciona una base sólida para evaluar el efecto combinado de la severidad del fuego y la estacionalidad sobre la riqueza de aves.

En la figura 5 muestra la distribución de la riqueza diaria de especies en función de la severidad del fuego. En el eje X se presentan las categorías (Bosque, Media-baja, Alta, Muy alta), y en el eje Y, el número de especies registradas por día. Cada gráfico de violín representa la densidad estimada de los valores observados: su elongación vertical indica el rango de valores de riqueza, mientras que su anchura horizontal refleja la concentración de observaciones en cada nivel de riqueza. Los puntos grises superpuestos corresponden a las observaciones diarias individuales.



**Figura 5.** Distribución de la riqueza de especies según la severidad del fuego. La anchura del violín refleja una mayor concentración de observaciones en ese valor de riqueza; los puntos grises representan el número total de especies registrado en cada día de muestreo; y la elongación vertical del gráfico representa el rango de riqueza de especies observado dentro de cada categoría de severidad, desde los valores mínimos hasta los máximos.

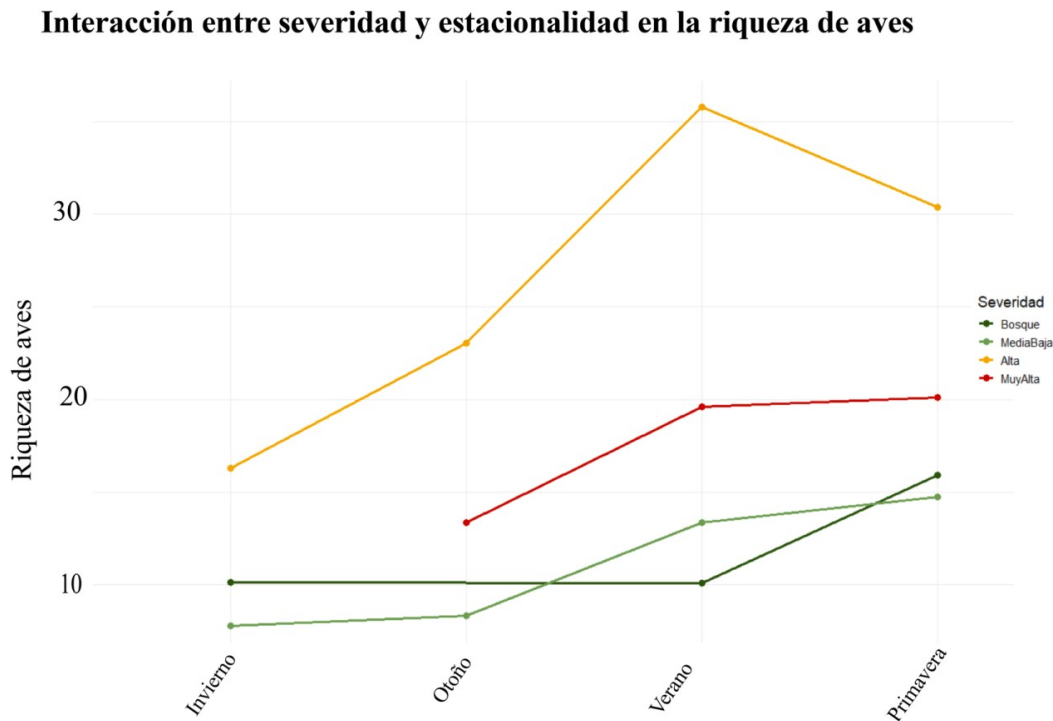
El gráfico de violín también permite observar diferencias en la variabilidad de la riqueza diaria entre categorías de severidad. Las categorías de bosque y severidad media-baja mostraron una menor amplitud en los valores registrados, lo que sugiere una riqueza relativamente estable a lo largo del muestreo. En ambos casos, la mayoría de los días se registraron entre 15 y 18 especies, con promedios generales de 11 y 12 especies por día, respectivamente.

Por su parte, los sitios con severidad alta presentaron la mayor dispersión en los datos, con registros de hasta 50 especies en un solo día. La mayor concentración de observaciones en esta categoría se dio en torno a las 25 especies diarias, alcanzando un promedio general de 28 especies, el valor más alto entre todas las categorías evaluadas.

En cuanto a la severidad muy alta, la riqueza diaria se concentró mayormente alrededor de las 15 especies, con un promedio general de 17 especies por día.

Para profundizar en las variaciones estacionales, se graficaron los promedios de riqueza registrados en cada estación del año dentro de cada categoría de severidad del fuego (Figura6). Esta representación permite observar cómo la riqueza promedio varía a lo largo del ciclo anual, influenciada de forma diferenciada por la estacionalidad según el nivel de perturbación.

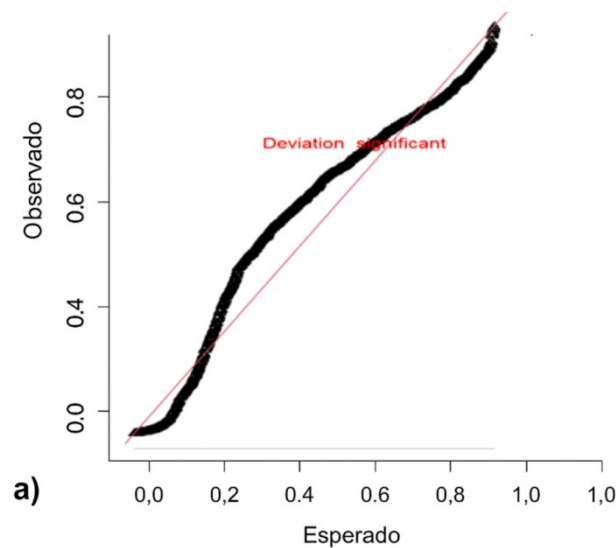
Las categorías de bosque y severidad media-baja mostraron los valores promedio más bajos durante todo el año, mientras que la severidad alta mantuvo los promedios más elevados en cada estación. La severidad muy alta se ubicó en un punto intermedio, con valores superiores al bosque y media-baja, pero por debajo de la severidad alta.



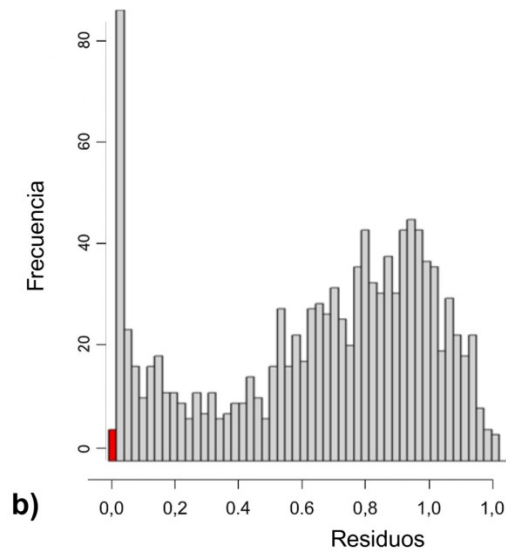
**Figura 6.** Variación estacional de la riqueza promedio de especies de aves según la severidad del fuego en el PNSSPM. Las líneas representan el promedio de riqueza diaria por estación (primavera, verano, otoño e invierno) para cada categoría de severidad: bosque, severidad media-baja, alta y muy alta. Las líneas verticales indican los intervalos de confianza del 95%.

Los intervalos de confianza mostraron valores cercanos entre las categorías media-baja, muy alta y bosque durante primavera y verano. Sin embargo, la significancia de estas comparaciones fue determinada por los contrastes post-hoc del modelo.

A continuación, se presentan los indicadores que respaldan la elección del MLGbn. El ajuste del modelo fue evaluado mediante el factor de dispersión ( $\phi$ ), cuyo valor fue de 1.29. Este valor, relativamente cercano a 1, sugiere que la varianza observada es aceptable en relación con la media, lo que es consistente con los supuestos de la regresión binomial negativa. La inspección de los residuos, a través de un gráfico cuantil-cuantil (QQ plot; Figura7), mostró algunas desviaciones respecto a la distribución teórica esperada (prueba de Kolmogorov–Smirnov,  $p < 0.05$ ). Asimismo, el histograma de residuos (Figura8) evidenció la presencia de algunos valores atípicos. Estas desviaciones no son inusuales en estudios ecológicos con datos de conteo, y no necesariamente implican un mal ajuste del modelo, sino que pueden reflejar la complejidad inherente de los sistemas biológicos (O’Hara & Kotze, 2010; Warton *et al.*, 2016).



**Figura 7.** Gráfico cuantil-cuantil (QQ plot) del MLGbn. Los residuos se desvían significativamente de la distribución teórica (Kolmogorov–Smirnov,  $p < 0.05$ ).



**Figura 8.** Histograma de residuos estandarizados del MLGbn. Se detectaron valores atípicos (en rojo).

El modelo completo, que incluye los efectos principales de la severidad del fuego, la estación del año y su interacción, presentó un ajuste significativamente mejor que el modelo nulo ( $\chi^2 = 653.66$ ,  $gl = 14$ ,  $p < 2.2e-16$ ). Esto indica que las variables explicativas consideradas contribuyen significativamente a explicar la variación observada en la riqueza de especies.

Cabe señalar que algunos días de muestreo no arrojaron registros acústicos debido a fallas técnicas, como errores en la configuración de los dispositivos o retrasos en su instalación. Estas observaciones fueron tratadas como datos faltantes (NA) y excluidas del análisis. Por lo tanto, los ceros presentes en los datos no representan ausencia biológica real de especies, sino simplemente falta de información. Esta característica descarta la necesidad de aplicar modelos con inflación de ceros.

En conjunto, estos resultados respaldan la idoneidad del modelo seleccionado para abordar la pregunta de investigación, aun considerando las limitaciones propias del trabajo de campo y la complejidad de los datos ecológicos.

Para interpretar los efectos estimados por el MLGbn, se transformaron los coeficientes mediante exponenciación, dado que el modelo emplea un enlace logarítmico. Esta

transformación permite expresar los resultados como razones de cambio en la riqueza de especies entre niveles de severidad del fuego y estaciones del año. Posteriormente, se calculó el cambio porcentual relativo con respecto a la categoría de referencia (el intercepto), utilizando la fórmula:

$$\text{Cambio porcentual} = (\exp(\beta) - 1) \times 100$$

Donde  $\beta$  representa el coeficiente estimado para cada nivel.

Esta aproximación facilita la interpretación ecológica de los resultados, ya que permite expresar los efectos en términos de incremento o disminución relativa en la riqueza de especies en comparación con una condición base.

La tabla III presenta los coeficientes transformados ( $\exp(\text{Estimate})$ ) obtenidos del MLGbn, considerando como grupo de referencia el bosque durante el invierno. Por tanto, los valores reflejan el cambio relativo en la riqueza de aves respecto a esta condición base. Cabe destacar que esta tabla incluye únicamente los coeficientes estadísticamente significativos; el conjunto completo de resultados, incluyendo los coeficientes no significativos, se encuentra disponible en la tabla A2 de los anexos.

**Tabla III.** Coeficientes exponenciados ( $\exp(\text{Coef})$ ) del MLGbn que evalúa los efectos de severidad, estación e interacción sobre la riqueza de aves. Los valores representan cambios relativos respecto al bosque en invierno (intercepto). La columna de significancia indica:  $p < 0.05$  (\*),  $p < 0.01$  (\*\*),  $p < 0.001$  (\*\*\*)

<b>Efecto</b>	<b>Coeficientes</b>	<b><math>\exp(\text{Coef } \beta)</math></b>	<b>p-valor</b>	<b>Significancia</b>	<b>Interpretación breve</b>
<b>(Intercept)</b>	2.31501	<b>10.128</b>	<2e-16	***	Riqueza base en bosque en invierno
<b>Severidad MediaBaja</b>	-0.26391	<b>0.768</b>	0.001319	**	23% menos riqueza que el bosque en invierno
<b>Severidad Alta</b>	0.47616	<b>1.609</b>	0.011493	*	61% más riqueza

					que el bosque en invierno
<b>Severidad MuyAlta</b>	0.23405	<b>1.263</b>	0.004608	**	26% más riqueza que el bosque en invierno
<b>Estación Verano</b>	0.45121	<b>1.57</b>	3.66E-11	***	57% más riqueza en verano que en invierno (en bosque)
<b>Sev MediaBaja: Est Primavera</b>	0.5474	<b>1.729</b>	0.000169	***	73% más riqueza en media-baja + primavera vs bosque en invierno
<b>Sev Alta: Est Primavera</b>	0.79322	<b>2.21</b>	0.000737	***	121% más riqueza en severidad alta + primavera
<b>Sev Muy alta: Est Primavera</b>	0.43255	<b>1.541</b>	0.017393	*	54% más riqueza en muy alta + primavera

El MLGbn reveló que la riqueza promedio de aves en el bosque durante el invierno fue de 10.13 especies ( $\exp(\beta) = 10.13$ ,  $p < 0.001$ ). En comparación con esta condición, se observó una reducción significativa del 23% en sitios con severidad media-baja ( $\exp(\beta) = 0.77$ ,  $p = 0.001$ ). Por el contrario, en sitios con severidad alta y muy alta, la riqueza aumentó significativamente en un 61% ( $\exp(\beta) = 1.61$ ,  $p = 0.011$ ) y un 26% ( $\exp(\beta) = 1.26$ ,  $p = 0.005$ ), respectivamente.

En cuanto a la estacionalidad, se detectó un incremento del 57% en la riqueza durante el verano en bosque, en comparación con el invierno ( $\exp(\beta) = 1.57$ ,  $p < 0.001$ ). Además, las interacciones entre la primavera y las diferentes categorías de severidad mostraron efectos positivos significativos, lo que sugiere una respuesta ecológica particular en esa estación. En comparación con el bosque en invierno, la riqueza aumentó un 73% en sitios con severidad

media-baja ( $\exp(\beta) = 1.73$ ,  $p < 0.001$ ), un 121% en severidad alta ( $\exp(\beta) = 2.21$ ,  $p < 0.001$ ) y un 54% en severidad muy alta ( $\exp(\beta) = 1.54$ ,  $p = 0.017$ ).

En conjunto, estos resultados indican que los efectos del fuego sobre la riqueza de aves no son lineales ni homogéneos a lo largo del año. Si bien los sitios con severidad media-baja tendieron a presentar menor riqueza, ciertas condiciones estacionales —en particular la primavera— parecen favorecer una mayor diversidad, incluso en áreas con altos niveles de perturbación.

El MLGbn estima los efectos de las variables explicativas comparando cada categoría con un grupo de referencia, definido como el intercepto del modelo (en este caso, el bosque durante el invierno). Por lo tanto, los coeficientes obtenidos reflejan cambios relativos en la riqueza de especies respecto a esta condición base.

Para profundizar en las diferencias estacionales dentro de cada categoría de severidad, se realizó un análisis de contrastes. Este análisis utiliza los coeficientes estimados por el GLMbn para comparar directamente las diferencias entre estaciones dentro de cada nivel de severidad, sin limitarse únicamente a la comparación con el intercepto. En otras palabras, los contrastes permiten evaluar las variaciones específicas entre combinaciones de categorías y estaciones, como si el intercepto se “moviera” temporalmente a cada grupo que se desea comparar.

De esta forma, el análisis de contrastes complementa el GLMbn tradicional al proporcionar comparaciones directas entre niveles, facilitando una interpretación más detallada de los patrones estacionales y su interacción con la severidad del fuego.

**Tabla IV.** Resultados del análisis de contrastes que comparan la riqueza de especies de aves entre estaciones del año dentro de cada categoría de severidad del fuego. Se presentan los estimados logarítmicos, sus exponentes, el cambio porcentual relativo y una breve interpretación del cambio para cada comparación estacional.

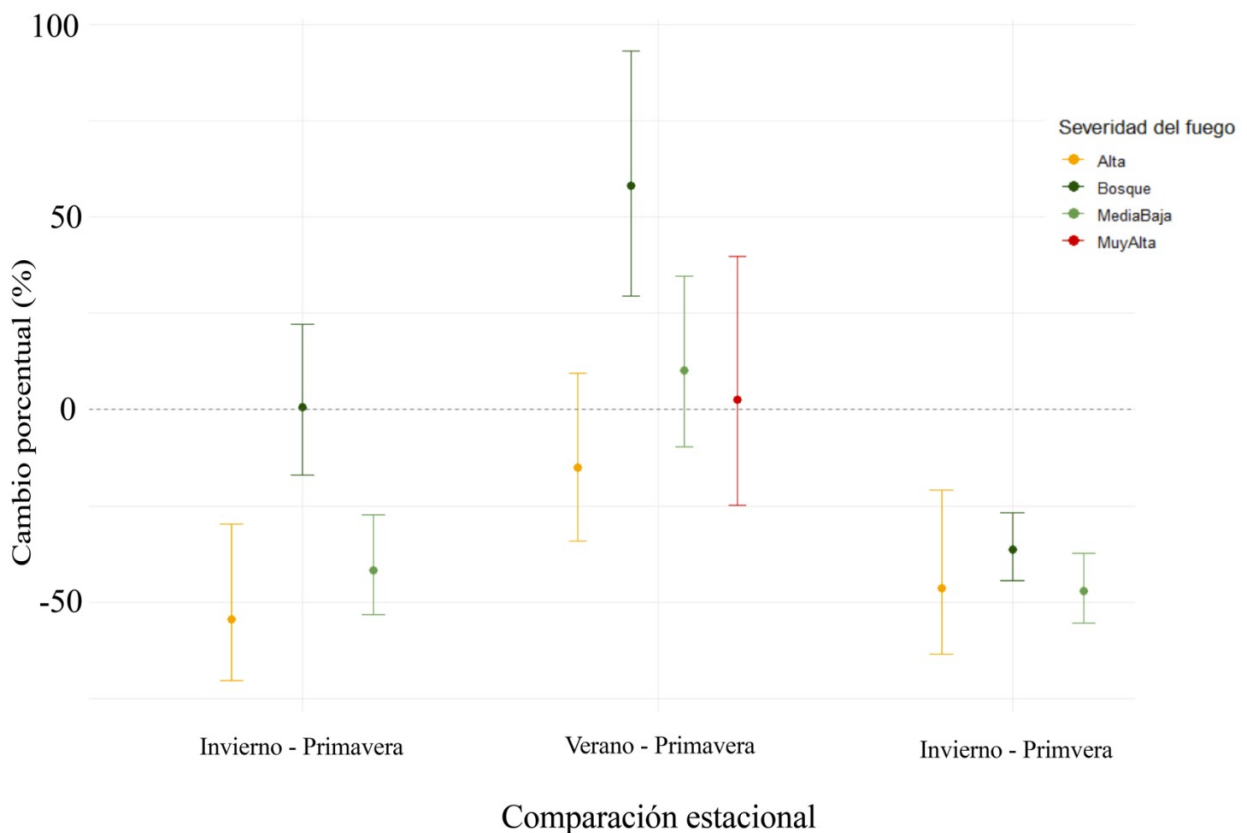
Severidad del fuego	Comparación estacional	Estimado (log)	Estimado exp.	Cambio %

Bosque	Verano - Primavera	0.46	1.58	58.10%
Bosque	Verano - Primavera	0.46	1.58	58.10%
Bosque	Invierno - Primavera	0.01	1.01	0.70%
Bosque	Invierno - Verano	-0.45	0.64	-36.30%
Media-Baja	Verano - Primavera	0.1	1.1	10.20%
Media-Baja	Invierno - Primavera	-0.54	0.58	-41.80%
Media-Baja	Invierno - Verano	-0.64	0.53	-47.20%
Alta	Verano - Primavera	-0.16	0.85	-15.10%
Alta	Invierno - Primavera	-0.79	0.46	-54.50%
Alta	Invierno - Verano	-0.62	0.54	-46.30%
Muy Alta	Verano - Primavera	0.03	1.03	2.60%
Muy Alta	Invierno - Primavera	NA	NA	NA
Muy Alta	Invierno - Verano	NA	NA	NA

El análisis reveló que los cambios estacionales fueron particularmente marcados en sitios con severidad media-baja y alta, donde la riqueza estimada de aves disminuyó en invierno en comparación con primavera y verano. La Tabla IV presenta únicamente los valores estimados del modelo (en escala logarítmica y transformada), el cambio porcentual relativo y una interpretación breve para cada comparación estacional; estos valores no incluyen medidas de incertidumbre ni indican significancia estadística. La información sobre intervalos de confianza y significancia de los contrastes se presenta en la figura 9. En el caso del bosque, se observó un aumento de la riqueza en verano respecto a primavera (+58%), aunque la riqueza disminuyó en invierno frente al verano (-36%), lo que sugiere un efecto estacional pronunciado en esta condición también.

En sitios con severidad media-baja, la riqueza fue un 42% menor en invierno respecto a primavera y un 47% menor frente al verano. Una tendencia similar se observó en áreas con severidad alta, donde la riqueza fue 55% menor en invierno comparado con primavera, y 46% menor frente al verano. Por otro lado, en áreas con severidad muy alta, no fue posible estimar los contrastes que involucraban al invierno debido a una baja cantidad de días muestreados durante esa estación. No obstante, el cambio entre primavera y verano fue pequeño (+3%), lo que sugiere una variación estacional más atenuada en estas zonas altamente perturbadas.

Estos resultados se visualizan en la figura 9, la cual presenta los cambios porcentuales estimados junto con sus respectivos intervalos de confianza. Esta representación facilita la comparación entre categorías de severidad y estaciones, y permite apreciar tanto la magnitud como la dirección de los cambios estacionales en la riqueza de aves.



**Figura 9.** Análisis de contraste o cambios porcentuales en la riqueza de aves entre estaciones dentro de cada categoría de severidad del fuego, estimados a partir del MLGbn. Se muestran los valores de cambio porcentual relativo junto con sus intervalos de confianza.

En conjunto, los distintos enfoques analíticos coincidieron en señalar que los efectos del fuego sobre la riqueza de aves en la Sierra de San Pedro Mártir no son lineales ni homogéneos, sino que varían según el nivel de severidad del incendio y la estación del año.

Los sitios con severidad alta mostraron los valores más altos de riqueza promedio, aunque con gran variabilidad diaria y una disminución notable durante el invierno. Este patrón sugiere que los incendios de alta intensidad pueden generar condiciones estructurales favorables para la avifauna, al menos temporalmente, aunque con una marcada sensibilidad estacional.

En contraste, el bosque presentó niveles bajos de riqueza a lo largo del año, con un incremento significativo en verano. Esta estacionalidad sugiere una dinámica más conservadora en términos de composición de hábitats, posiblemente limitada por el dosel cerrado o la menor heterogeneidad estructural.

La severidad media-baja se caracterizó por riqueza relativamente baja y estable, pero con una reducción clara en invierno, lo que indica una menor capacidad para sostener comunidades diversas durante la época más desfavorable. Por su parte, la severidad muy alta mostró una riqueza promedio intermedia, con patrones estacionales más suaves, aunque los análisis estuvieron limitados por la escasez de datos en invierno.

## **Discusión**

Estos hallazgos reflejan que tanto la intensidad del disturbio como el momento del año interactúan para modelar las condiciones de hábitat disponibles para las aves, generando respuestas diferenciadas en la riqueza a lo largo del gradiente de severidad y del ciclo anual.

Los resultados de este estudio revelan que la riqueza de aves responde de manera compleja a los efectos del fuego y su interacción con la estacionalidad. Lejos de observar una disminución lineal asociada al incremento en la severidad del incendio, se identificaron patrones no intuitivos, donde algunos niveles intermedios y altos de perturbación estuvieron asociados a una mayor riqueza de especies, especialmente fuera del invierno.

Estos hallazgos desafían la suposición común de que el fuego representa únicamente una amenaza para la biodiversidad, y en cambio, sugieren que ciertos regímenes de severidad pueden generar condiciones favorables para la avifauna, al aumentar la heterogeneidad estructural o disponibilidad de recursos, en sintonía con lo propuesto por la hipótesis del disturbio intermedio (Connell, 1978; Shea *et al.*, 2004).

Asimismo, la estacionalidad emerge como un modulador clave de estas respuestas. La primavera y el verano se asociaron sistemáticamente con un aumento en la riqueza, incluso en áreas perturbadas, lo que podría estar vinculado a factores como la llegada de migrantes reproductores, la disponibilidad de recursos alimenticios y la fenología de la vegetación post-fuego.

En conjunto, estos resultados subrayan la importancia de considerar tanto las características del disturbio como las dinámicas temporales al evaluar los efectos ecológicos del fuego, especialmente en ecosistemas mediterráneos como el de la Sierra de San Pedro Mártir, donde los ciclos estacionales y las perturbaciones naturales coexisten de forma histórica.

Uno de los hallazgos más relevantes del estudio fue la marcada heterogeneidad en las respuestas de la riqueza de aves a lo largo del gradiente de severidad del fuego. A diferencia de lo que podría esperarse bajo una visión lineal del disturbio, no se observó una disminución

progresiva de la riqueza conforme aumentaba la severidad. En cambio, se encontraron diferencias contrastantes que sugieren mecanismos ecológicos distintos operando en cada nivel de perturbación. Los sitios con severidad alta presentaron la mayor riqueza promedio y una alta variabilidad diaria. Este patrón podría relacionarse con un aumento en la heterogeneidad estructural tras el incendio, lo que genera una mayor diversidad de nichos y oportunidades para especies con diferentes requerimientos ecológicos (Tingley *et al.*, 2016). La abundancia de claros, tocones, árboles muertos en pie y nuevos brotes puede atraer tanto a especies oportunistas como a especialistas en hábitats abiertos.

En contraste, las áreas con severidad media-baja mostraron una riqueza relativamente baja y estable, lo que podría indicar que los cambios inducidos por el fuego no fueron lo suficientemente intensos como para generar nuevos recursos o hábitats, pero sí afectaron parcialmente la cobertura vegetal, resultando en condiciones subóptimas para muchas especies.

El bosque también presentó riqueza reducida, aunque con una marcada estacionalidad. La menor riqueza podría deberse a la estructura más cerrada del dosel y menor heterogeneidad del hábitat, condiciones que benefician a un subconjunto más restringido de especies (Fontaine & Kennedy, 2012). Sin embargo, en verano, el aumento en la riqueza podría deberse a la llegada de migrantes estivales o a un mayor uso del bosque como área de reproducción o alimentación.

Cabe señalar que, aunque el bosque no quemado cumple un papel para ciertas especies, en este ecosistema la recurrencia histórica de incendios de baja severidad ha sido fundamental para mantener una estructura abierta y una alta heterogeneidad del hábitat. Por ello, desde una perspectiva de manejo, un paisaje dominado por áreas de baja a moderada severidad, intercaladas con parches de alta severidad, puede ser más representativo del régimen natural y favorecer la biodiversidad a largo plazo.

Finalmente, la severidad muy alta mostró una riqueza intermedia y un patrón estacional más tenue. Aunque los datos para invierno fueron limitados, este comportamiento podría reflejar una comunidad de aves compuesta por especies tolerantes a condiciones extremas o con alta capacidad de colonización post-disturbio. La respuesta menos estacional también sugiere un

posible reacomodo funcional, donde ciertas especies ocupan los vacíos dejados por otras más sensibles.

Los patrones observados en este estudio tienen implicaciones importantes para la gestión y conservación de los ecosistemas afectados por incendios. En primer lugar, los resultados respaldan la idea de que no todos los incendios tienen consecuencias negativas sobre la biodiversidad, y que ciertos niveles de severidad pueden incluso favorecer la riqueza de aves, al menos de forma temporal.

Esto resalta la necesidad de adoptar una visión más matizada en el manejo del fuego, especialmente en ecosistemas mediterráneos donde el fuego ha sido históricamente parte del régimen ecológico natural. Estrategias que buscan eliminar por completo los incendios o aplicar tratamientos uniformes de restauración podrían no ser adecuadas, ya que podrían reducir la heterogeneidad del paisaje y, con ella, la diversidad de especies asociadas.

Además, la marcada estacionalidad en las respuestas sugiere que la planificación de actividades de monitoreo, restauración o manejo debe considerar el ciclo anual de las especies. Por ejemplo, intervenir en primavera o verano podría coincidir con los picos de diversidad y afectar a especies reproductoras sensibles.

Por otro lado, la respuesta poco favorable observada en sitios con severidad media-baja plantea un reto para las estrategias de manejo. Estos lugares, que suelen pasar desapercibidos por su bajo nivel de daño, podrían requerir atención específica, ya que podrían estar en una especie de “zona gris” donde no se generan ni los beneficios del disturbio ni se conserva adecuadamente la estructura original del bosque.

En suma, el estudio sugiere que un enfoque de manejo basado en la heterogeneidad, el contexto ecológico y la dinámica estacional puede ser más efectivo que estrategias homogéneas centradas únicamente en la prevención o supresión del fuego.

## Conclusiones

Este estudio demuestra que los efectos del fuego sobre la riqueza de aves en un ecosistema mediterráneo no siguen un patrón lineal ni uniforme. Tanto la severidad del incendio como la estacionalidad influyen significativamente en la riqueza observada, revelando respuestas contrastantes entre categorías de severidad y estaciones del año. Estas variaciones reflejan la complejidad de las dinámicas post-fuego y la influencia de factores temporales en la estructuración de las comunidades de aves.

Particularmente, los sitios con severidad alta y muy alta mostraron un aumento significativo en la riqueza de especies en comparación con el bosque durante el invierno, lo cual sugiere que ciertos niveles de perturbación pueden generar condiciones favorables para la diversidad aviar incluso 20 años después del evento (Trancón *et al.*, 2024; Steel *et al.*, 2022). Por el contrario, los sitios con severidad media-baja presentaron reducciones en la riqueza, alineándose con estudios que advierten sobre los efectos negativos de perturbaciones intermedias que no generan una estructura hábitat suficientemente diversa (Barros & Marini, 2012; William *et al.*, 2012).

En cuanto a la estacionalidad, la primavera y el verano fueron las estaciones con mayor riqueza en la mayoría de los sitios, especialmente cuando se combinaron con condiciones perturbadas. Estos patrones evidencian la necesidad de considerar el ciclo estacional en la interpretación de los efectos del fuego, ya que su influencia puede modular o amplificar los efectos de la perturbación sobre la comunidad de aves.

En conjunto, los hallazgos subrayan que el fuego no debe concebirse únicamente como un agente destructivo, sino también como un factor ecológico que, dependiendo del contexto, puede favorecer la biodiversidad. Comprender esta complejidad resulta esencial para diseñar estrategias de conservación y manejo más efectivas, especialmente en escenarios donde los regímenes de fuego son cada vez más intensos y frecuentes. La integración de la severidad del fuego con la estacionalidad puede orientar acciones de restauración y monitoreo más precisas, enfocadas en los momentos y sitios con mayor capacidad de recuperación ecológica.

### **Limitaciones y perspectivas de análisis futuro**

Si bien este estudio se centró en la riqueza de especies como variable principal para evaluar los efectos de la severidad del fuego y la estacionalidad sobre la avifauna, los datos recolectados permiten un análisis más profundo que aún no ha sido explotado. Cada registro acústico cuenta con información sobre la identidad de las especies, lo cual posibilita explorar aspectos adicionales como los gremios alimenticios, su estatus migratorio (residente o migratoria) y los tipos de nidificación. Estos atributos ecológicos podrían aportar una visión más detallada sobre qué tipos funcionales de aves se ven favorecidos o afectados bajo distintas condiciones de severidad del fuego y temporalidad. Sin embargo, debido a las limitaciones de tiempo y a la viabilidad de finalización del grado, se optó por no incorporar dichos análisis en esta etapa. Se prevé su implementación en trabajos futuros, con el objetivo de enriquecer la comprensión de las respuestas funcionales de la avifauna frente al disturbio por fuego en ecosistemas de coníferas.

## Bibliografía

- Stillman, A. N., Siegel, R. B., Wilkerson, R. L., Johnson, M., Tingley, M. W., & Saracco, J. F. (2019). *Black-backed Woodpecker occupancy in burned and beetle-killed forests: Distinguishing habitat use from availability*. **Forest Ecology and Management**, **433**, 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.10.056>
- Stillman, A. N., Siegel, R. B., Wilkerson, R. L., Tingley, M. W., & Johnson, M. (2021). Natal dispersal of a burned-forest specialist, the Black-backed Woodpecker. **The Condor**, **123**(2), duab010. <https://doi.org/10.1093/condor/duab010>
- Stillman, A. N., Wilkerson, R. L., Siegel, R. B., Johnson, M., & Tingley, M. W. (2023). Incorporating pyrodiversity into wildlife habitat assessments for rapid post-fire management: A woodpecker case study. **Wildlife Society Bulletin**, **47**(2), e1410. <https://doi.org/10.1002/wsb.1410>
- Navarro, A., Utzet, F., Puig, P., Caminal, J., & Martín, M. (2001). La distribución binomial negativa frente a la de Poisson en el análisis de fenómenos recurrentes. *Gaceta Sanitaria*, **15**(5), 447–452. [https://doi.org/10.1016/S0213-9111\(01\)71599-3](https://doi.org/10.1016/S0213-9111(01)71599-3)
- Agee, J. K. (1996). *Fire Ecology of Pacific Northwest Forests*. Island Press. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/43410231\\_Fire\\_Ecology\\_of\\_Pacific\\_Northwest\\_Forests](https://www.researchgate.net/publication/43410231_Fire_Ecology_of_Pacific_Northwest_Forests)
- Aguilera-Ortega J.E. 2020. Efectos ecológicos del fuego sobre la avifauna de un bosque en El Salvador. *Huitzil* 22(1): e-607. doi: <https://doi.org/10.28947/hrmo.2021.22.1.490>
- Alicia Azpeleta Tarancón, Peter Z. Fulé, and Abel García Arévalo. 2024. Mexican mixed-species forest shows resilience to high-intensity fire. *Canadian Journal of Forest Research*. 54(5): 500-511. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2023-0185>
- Barros, C. S., & Marini, M. A. (2012). "The effects of fire on bird communities in the Brazilian Cerrado." *Journal of Avian Biology*, **43**(3), 264-274.
- Bartheld, Jose & Moreno-Gómez, Felipe & Soto-Gamboa, Mauricio & Silva-Escobar, Andrés & Suazo, Cristián. (2011). Monitoreo Acústico de Aves y Anfibios en el Bosque Costero Valdiviano. 10.13140/RG.2.1.5171.5927.
- Bond, Monica & Siegel, Rodney & Hutto, Richard & Saab, Victoria & Shunk, Stephen. (2012). A New Forest Fire Paradigm: The need for high-severity fires. *The Wildlife Professional*. 6.

- Brink, B. A., & Eva, D. H. (2009). Monitoring 25 years of land cover change dynamics in Africa: A sample based remote sensing approach. *Elsevier*, 29(4), 501–512. <https://doi.org/doi:10.1016/j.apgeog.2008.10.004>
- Burrows, N. D. (2008). Linking fire ecology and fire management in south-west Australian forest landscapes. *Forest Ecology and Management*, 255(7), 2394–2406. <https://doi.org/doi:10.1016/j.foreco.2008.01.009>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2015). Programa de Conservación y Manejo del Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir. Recuperado de [https://simec.conanp.gob.mx/pdf\\_libro\\_pm/119\\_libro\\_pm.pdf](https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/119_libro_pm.pdf)
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2024). Ficha técnica del Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir. Sistema de Información, Monitoreo y Evaluación para la Conservación (SIMEC). <https://simec.conanp.gob.mx/ficha.php?anp=119&reg=1>
- Delgadillo Rodríguez Jose. (2004). El bosque de coníferas de la Sierra de San Pedro Mártir, Baja California. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología.
- Evet, R. R., Franco-Vizcaino, E., & Stephens, S. L. (2007). Comparing modern and past fire regimes to assess changes in prehistoric lightning and anthropogenic ignitions in a Jeffrey pine–mixed conifer forest in the Sierra San Pedro Mártir, Mexico. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(2), 318-330.
- Fontaine, J. B., Donato, D. C., Robinson, W. D., Law, B. E., & Kauffman, J. B. (2009). Bird communities following high-severity fire: Response to single and repeat fires in a mixed-evergreen forest, Oregon, USA. *Forest Ecology and Management*, 257(6), 1496-1504. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.12.030>
- Gallina, S., & López-González, C. (2011). Manual de Técnicas para el estudio de la Fauna. Universidad Autónoma de Querétaro-Instituto de Ecología, A. C., 1, 390.
- Helms, J.A. (Editor). 1998. *The Dictionary of Forestry*. Society of American Foresters. Bethesda, Md. 210 pps.
- Hobson, K. A., Rempel, R. S., Greenwood, H., Turnbull, B., & Wilgenburg, S. L. V. (2002). Acoustic Surveys of Birds Using Electronic Recordings: New Potential from an Omnidirectional Microphone System. *Wildlife Society Bulletin*, 30(3), 709–720. <https://www.jstor.org/stable/3784223>

- Jakub, P., Smith, J., & Lee, A. (2018). Overdispersion in ecological count data: implications for modeling species abundance. *Ecology Letters*, 21(4), 531–543. <https://doi.org/10.1111/ele.12925>
- Keeley, J.E. 2009. Fire intensity, fire severity, and burn severity: a brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*. (18):116-126.
- Kent, M. (2012). *Vegetation description and data analysis: A practical approach* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.
- Williams, Richard & Wahren, C-H & Shannon, James & Papst, Warwick & Heinze, Dean & Camac, James. (2012). Fire regimes and Biodiversity in Victoria's alpine ecosystems.. *Proceedings and Transactions of the Royal Society of Victoria*. 124. 101-109. 10.1071/RS12101.
- Minnich, R. A., Barbour, M. G., Burk, J. H., & Sosa-Ramirez, J. (2000). Californian mixed-conifer forests under unmanaged fire regimes in the Sierra San Pedro Mártir, Baja California, Mexico. *Journal of Biogeography*, 27(1), 105-129.
- Mueller-Dombois, Dieter & Ellenberg, Heinz. (1974). *Aims and Methods of Vegetation Ecology*. 10.2307/213332.
- O'Hara, R. B., & Kotze, D. J. (2010). Do not log-transform count data. *Methods in Ecology and Evolution*, 1(2), 118–122. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2010.00021.x>
- Palencia, P., Rowcliffe, J. M., Vicente, J., & Acevedo, P. (2021). Assessing the camera trap methodologies used to estimate density of unmarked populations. *Journal of Applied Ecology*, 58(8), 1583–1592. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13913>
- Priyadarshani, N., Marsland, S., & Castro, I. (2022). A review on automated birdsong recognition using machine learning techniques. *Ecological Informatics*, 67, 101560. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101560>.
- Pulido Díaz, A., & Payán Garrido, E. (2012). *Manual de fototrampeo: Una herramienta de investigación para la conservación de la biodiversidad en Colombia*. Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y Panthera Colombia.
- Ralph, C. J., & Scott, J. M. (1981). Estimating Numbers of Terrestrial Birds. *Cooper Ornithological Society*, 6(34–41), 641.
- Reid, D. S., Wood, C. M., Whitmore, S. A., Berigan, W. J., Kramer, H. A., Kryshak, N. F., Keane, J. J., Sawyer, S. C., Gutiérrez, R. J., Klinck, H., & Peery, M. Z. (2022). Breeding

- status shapes territoriality and vocalization patterns in spotted owls. *Journal of Avian Biology*, 2022(8), e02952. <https://doi.org/10.1111/jav.02952>.
- Rivera-Huerta, H., Safford, H. D., & Miller, J. D. (2016). Patterns and Trends in Burned Area and Fire Severity from 1984 to 2010 in the Sierra de San Pedro Mártir, Baja California, Mexico. *Fire Ecology*, 12(1), 52–72. <https://doi.org/10.4996/fireecology.1201052>
- Salas-Correa, Ángel-David, & Mancera-Rodríguez, Néstor-Javier. (2020). Aves como indicadoras ecológicas de etapas sucesionales en un bosque secundario, Antioquia, Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 68(1), 23-39. <https://dx.doi.org/10.15517/rbt.v68i1.34913>
- SEMARNAT. (2021). Parques Nacionales de México. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/parques-nacionales-de-mexico>
- Silveira, L., Jácomo, A. T. A., & Diniz-Filho, J. A. F. (2003). Camera trap, line transect census and track surveys: A comparative evaluation. *Biological Conservation*, 114(3), 351–355. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(03\)00063-6](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(03)00063-6)
- Sociedad Española de Ornitología. SEO. (2013). Las aves son un indicador de calidad de vida y un espectáculo natural. Recuperado el 27 de enero de 2025, de <https://seo.org/las-aves-son-un-indicador-de-calidad-de-vida-y-un-espectaculo-natural/>
- Steel ZL, Fogg AM, Burnett R, Roberts LJ, Safford HD. When bigger isn't better—Implications of large high-severity wildfire patches for avian diversity and community composition. *Divers Distrib*. 2022; 28: 439–453. <https://doi.org/10.1111/ddi.13281>
- Steel, Z. L., Fogg, A. M., Burnett, R., Roberts, L. J., & Safford, H. D. (2022). When bigger isn't better—Implications of large high-severity wildfire patches for avian diversity and community composition. *Diversity and Distributions*, 28(3), 439-453. <https://doi.org/10.1111/ddi.13281>
- Steel, Z. L., Fogg, A. M., Buzbee, R. F., Wilkin, K., Collins, B. M., Burnett, R., Meyer, M. D., Wuenschel, A., & Stephens, S. L. Finding floral and faunal species richness optima among active fire regimes. *Conservation Biology*, e70079. <https://doi.org/10.1111/cobi.70079>
- Steel, Z. L., Safford, H. D., & Viers, J. H. (2015). The fire frequency-severity relationship and the legacy of fire suppression in California forests. *Ecosphere*, 6(1), 1–23. <https://doi.org/10.1890/ES14-00224.1>
- Stephens, S. L., Fossum, C., Collins, B. M., & Huerta, H. R. (2024). Early impacts of fire

- suppression in Jeffrey pine – Mixed conifer forests in the Sierra San Pedro Martir, Mexico. *Forest Ecology and Management*, 564, 122003. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122003>
- Stephens, S. L., Fry, D. L., Collins, B. M., Skinner, C. N., Franco-Vizcaíno, E., & Freed, T. J. (2010). Fire-scar formation in Jeffrey pine–mixed conifer forests in the Sierra San Pedro Mártir, Mexico. *Canadian Journal of Forest Research*, 40(8), 1497–1505. <https://doi.org/10.1139/x10-083>
- Stephens, S. L., Kobziar, L. N., Collins, B. M., Davis, R., Fulé, P. Z., Gaines, W., Ganey, J., Guldin, J. M., Hessburg, P. F., Hiers, K., Hoagland, S., Keane, J. J., Masters, R. E., McKellar, A. E., Montague, W., North, M., & Spies, T. A. (2019). Is fire “for the birds”? How two rare species influence fire management across the US. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 17(7), 391-399. <https://doi.org/10.1002/fee.2076>
- Stephens, S. L., Skinner, C. N., & Gill, S. J. (2003). Dendrochronology-based fire history of Jeffrey pine - mixed conifer forests in the Sierra San Pedro Martir, Mexico. *Canadian Journal of Forest Research*, 33(6), 1090–1101. <https://doi.org/10.1139/x03-031>
- Taillie, P. J., Burnett, R. D., Roberts, L. J., Campos, B. R., Peterson, M. N., & Moorman, C. E. (2018). Interacting and non-linear avian responses to mixed-severity wildfire and time since fire. *Ecosphere*, 9(6), e02291. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2291>
- Tingley, M. W., Ruiz-Gutiérrez, V., Wilkerson, R. L., Howell, C. A., & Siegel, R. B. (2016). Pyrodiversity promotes avian diversity over the decade following forest fire. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 283(1840), 20161703. <https://doi.org/10.1098/rspb.2016.1703>
- Vold, S. T., Handel, C. M., & McNew, L. B. (2017). Comparison of acoustic recorders and field observers for monitoring tundra bird communities: Acoustic Monitoring of Tundra-Breeding Birds. *Wildlife Society Bulletin*, 41(3), 566–576. <https://doi.org/10.1002/wsb.785>
- Warton, D. I., Lyons, M., Stoklosa, J., & Ives, A. R. (2016). Three points to consider when choosing a LM or GLM test for count data. *Methods in Ecology and Evolution*, 7(8), 882–890. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12552>
- White, A. M., Manley, P. N., Tarbill, G. L., Richardson, T. W., Russell, R. E., Safford, H. D., & Dobrowski, S. Z. (2016). Avian community responses to post-fire forest structure:

- Implications for fire management in mixed conifer forests. *Animal Conservation*, 19(3), 256-264. <https://doi.org/10.1111/acv.12237>
- Whittaker, R. H. (Ed.). (1978). *Classification of Plant Communities*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-9183-5>
- Wood, C. M., Klinck, H., Gustafson, M., Keane, J. J., Sawyer, S. C., Gutiérrez, R. J., & Peery, M. Z. (2021). Using the ecological significance of animal vocalizations to improve inference in acoustic monitoring programs. *Conservation Biology*, 35(1), 336-345. <https://doi.org/10.1111/cobi.13516>.
- Wood, C. M., Socolar, J., Kahl, S., Peery, M. Z., Chaon, P., Kelly, K., Koch, R. A., Sawyer, S. C., & Klinck, H. (2024). A scalable and transferable approach to combining emerging conservation technologies to identify biodiversity change after large disturbances. *Journal of Applied Ecology*, 61(4), 797-808. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14579>
- Zarza, H., Chávez, C., & Medellin, R. (2013). *Manual de fototrampeo para estudio de fauna silvestre. El jaguar en México como estudio de caso*. Alianza WWF-Telcel, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Zhou, X., & Hemstrom, M. A. (2009). Estimating aboveground tree biomass on forest land in the Pacific Northwest: A comparison of approaches (PNW-RP-584; p. PNW-RP-584). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. <https://doi.org/10.2737/PNW-RP-584>.

## Anexos

**Tabla A1.** Inventario completo de especies de aves detectadas en el estudio, detallando la severidad del fuego y la estación del año en que fueron registradas.

<b>Especie</b>	<b>Severidades</b>	<b>Estaciones</b>
Pinyon Jay	Bosque, Media-Baja	Invierno, Otoño
Western Bluebird	Alta, Bosque, MuyAlta	Invierno, Otoño, Verano
Acorn Woodpecker	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Allen's Hummingbird	MuyAlta	Otoño, Verano
American Goldfinch	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
American Kestrel	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
American Pipit	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
American Robin	Alta, MuyAlta	Otoño, Verano
Anna's Hummingbird	Alta, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Ash-throated Flycatcher	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano

Band-tailed Pigeon	Alta	Primavera, Verano
Barn Owl	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Barn Swallow	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Bell's Sparrow	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Bell's Vireo	Alta, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Bewick's Wren	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Black-chinned Hummingbird	MuyAlta	Otoño, Verano
Black-chinned Sparrow	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Black-headed Grosbeak	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Black-throated Gray Warbler	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Black-throated Sparrow	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Blue-gray Gnatcatcher	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Blue Grosbeak	Alta, MuyAlta	Otoño, Verano
Brewer's Blackbird	Alta, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Verano
Brewer's Sparrow	Alta, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Brown-headed Cowbird	Alta	Verano
Bullock's Oriole	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Burrowing Owl	MuyAlta	Otoño, Verano
Bushtit	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Cactus Wren	Alta, MuyAlta	Otoño, Verano
California Gnatcatcher	Alta, Bosque, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
California Quail	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
California Scrub-Jay	Alta, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
California Thrasher	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Verano
California Towhee	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Calliope Hummingbird	Bosque	Verano
Canyon Wren	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Cassin's Finch	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Cassin's Kingbird	Alta, Bosque, MuyAlta	Otoño, Verano
Cassin's Vireo	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Cedar Waxwing	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Chipping Sparrow	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Clark's Nutcracker	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Cliff Swallow	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Common Poorwill	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Common Raven	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Common Yellowthroat	Alta, Media-Baja, MuyAlta	Verano
Cooper's Hawk	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Costa's Hummingbird	Alta, MuyAlta	Verano
Crissal Thrasher	Alta, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Dark-eyed Junco	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Dusky Flycatcher	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Eurasian Collared-Dove	MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
European Starling	Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano

Flammulated Owl	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Fox Sparrow	Alta, MuyAlta	Otoño, Verano
Gila Woodpecker	MuyAlta	Otoño, Verano
Gilded Flicker	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Golden-crowned Kinglet	Alta, Bosque, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Golden-crowned Sparrow	Alta, MuyAlta	Otoño, Verano
Gray Flycatcher	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Gray Vireo	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Great Horned Owl	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Greater Roadrunner	Alta, MuyAlta	Primavera, Verano
Green-tailed Towhee	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Hairy Woodpecker	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Hammond's Flycatcher	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Hermit Thrush	Alta, Bosque, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Hermit Warbler	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Hooded Oriole	Alta, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Horned Lark	Alta, Bosque, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
House Finch	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
House Sparrow	Alta, MuyAlta	Primavera, Verano
House Wren	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Hutton's Vireo	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Ladder-backed Woodpecker	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Lark Bunting	MuyAlta	Verano
Lark Sparrow	Alta, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Lawrence's Goldfinch	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Lazuli Bunting	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Lesser Goldfinch	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Lesser Nighthawk	Alta, Bosque, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Lewis's Woodpecker	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Lincoln's Sparrow	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Loggerhead Shrike	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Long-eared Owl	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
MacGillivray's Warbler	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Merlin	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Verano
Mountain Bluebird	Alta, Bosque, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Mountain Chickadee	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Mountain Quail	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Mourning Dove	Alta, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Nashville Warbler	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Northern Flicker	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Northern Harrier	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Verano
Northern Mockingbird	MuyAlta	Primavera, Verano
Northern Saw-whet Owl	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Nuttall's Woodpecker	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano

Oak Titmouse	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Olive-sided Flycatcher	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Orange-crowned Warbler	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Pacific-slope Flycatcher	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Palm Warbler	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Peregrine Falcon	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Phainopepla	Alta, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Pine Siskin	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Pinyon Jay	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Purple Finch	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Purple Martin	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Pygmy Nuthatch	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Red-breasted Sapsucker	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Red-naped Sapsucker	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Red-shouldered Hawk	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Verano
Red-tailed Hawk	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Verano
Red Crossbill	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Rock Wren	Alta, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Ruby-crowned Kinglet	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Rufous-crowned Sparrow	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Rufous Hummingbird	MuyAlta	Otoño, Verano
Sage Thrasher	MuyAlta	Verano
Say's Phoebe	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Scott's Oriole	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Sharp-shinned Hawk	Bosque	Verano
Spotted Owl	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Spotted Towhee	Alta, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Summer Tanager	Alta, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Verano
Swainson's Thrush	Alta, Bosque, MuyAlta	Invierno, Otoño, Verano
Townsend's Solitaire	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Townsend's Warbler	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Tree Swallow	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Varied Thrush	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Vaux's Swift	Alta, MuyAlta	Otoño, Verano
Verdin	MuyAlta	Otoño, Verano
Vermilion Flycatcher	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Vesper Sparrow	Alta, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Violet-green Swallow	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Warbling Vireo	Alta, Bosque, Media-Baja	Otoño, Primavera, Verano
Western Bluebird	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Western Kingbird	Alta, Bosque, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Western Screech-Owl	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Western Tanager	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Western Wood-Pewee	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano

White-breasted Nuthatch	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
White-crowned Sparrow	Alta, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
White-tailed Kite	Alta, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
White-throated Swift	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
White-winged Dove	MuyAlta	Primavera
Williamson's Sapsucker	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Willow Flycatcher	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Wilson's Warbler	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Wrentit	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Yellow-bellied Sapsucker	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Invierno, Otoño, Primavera, Verano
Yellow-billed Cuckoo	Alta, Bosque, MuyAlta	Invierno, Otoño, Verano
Yellow-breasted Chat	MuyAlta	Otoño, Verano
Yellow-rumped Warbler	Alta, Bosque, Media-Baja, MuyAlta	Otoño, Primavera, Verano
Zone-tailed Hawk	MuyAlta	Otoño, Verano

**Tabla A2.** Resultados completos del modelo lineal generalizado con distribución binomial negativa (MLGbn) sobre la riqueza de especies de aves. Se muestran las estimaciones de coeficientes logarítmicos (Coef. log ( $\beta$ )), error estándar, valores p, riqueza esperada ( $e^{\beta}$ ) y el porcentaje de cambio relativo respecto al grupo de referencia (bosque en invierno) para todas las combinaciones de estación y severidad del fuego, incluyendo tanto resultados significativos como no significativos.

Estación	Severidad	Coef. log ( $\beta$ )	Error estándar	p-valor	Riqueza esperada ( $e^{\beta}$ )	% cambio vs bosque
<b>Invierno</b>	Bosque	2.31501	0.04497	< 0.001	10.13	—
	Media-Baja	2.0511	0.08217	0.0013	7.77	-23.30%
	Alta	2.79117	0.1884	0.0115	16.32	61.10%
	Muy Alta	2.54906	0.08261	0.0046	12.79	26.30%
<b>Primavera</b>	Bosque	2.30834	0.09587	< 0.001	10.06	—
	Media-Baja	2.59283	0.11407	< 0.001	13.37	32.90%
	Alta	3.10257	0.20891	< 0.001	22.24	121.10%
	Muy Alta	2.75457	0.16464	0.0174	15.71	56.20%
<b>Verano</b>	Bosque	2.76622	0.06819	< 0.001	15.89	—
	Media-Baja	2.6896	0.09562	< 0.001	14.71	-7.40%
	Alta	3.2386	0.2008	< 0.001	25.5	60.40%
	Muy Alta	3.00022*	NA	NA	—	—
<b>Otoño</b>	Bosque	2.35709	0.10415	< 0.001	10.56	—
	Media-Baja	2.37862	0.11452	< 0.001	10.79	2.20%
	Alta	3.1171	0.23388	0.1754	22.6	113.90%
	Muy Alta	NA	NA	NA	—	—

## CAPÍTULO III

### **Guía para el Monitoreo de Aves en Áreas Post-Incendio: Herramientas para un Manejo Integral del Fuego**

#### **Resumen**

Este capítulo describe una guía que pretende mostrar el proceso de monitoreo acústico de aves como herramienta para evaluar los efectos ecológicos de incendios forestales en áreas naturales protegidas. Se detalla la metodología para el análisis de grabaciones mediante software especializado, recomendando el uso de Raven Pro y el modelo BirdNet Global 6K para la clasificación automatizada de vocalizaciones. Se enfatiza la necesidad de colaboración con personal capacitado para el procesamiento y depuración de datos, así como la aplicación de análisis estadísticos adecuados —desde pruebas básicas hasta modelaciones ecológicas avanzadas— según los objetivos del estudio. No obstante, la guía propuesta en esta tesis se limita al diseño e implementación del monitoreo acústico avifaunístico, incluyendo la selección de sitios, la estandarización del muestreo y recomendaciones básicas para el análisis e interpretación de datos en función de la severidad del fuego y la estacionalidad. La aplicación de técnicas estadísticas más complejas o la integración con otras fuentes de datos (p. ej., vegetación, microhábitat o clima) se considera una fase complementaria a desarrollar según las capacidades y necesidades específicas de cada institución o proyecto. Los resultados esperados incluyen la identificación de patrones de recuperación ecológica, evaluación de medidas de manejo post-incendio y el fortalecimiento de procesos de gobernanza local. Asimismo, se destaca la importancia de las aves como bioindicadores y la utilidad de los datos generados para apoyar decisiones de conservación basadas en evidencia. Finalmente, se proporciona una selección de literatura especializada en ecología del fuego para respaldar la capacitación técnica y el diseño de estrategias de restauración en el contexto del manejo adaptativo del fuego en la región mediterránea de Baja California, México.

## **Prefacio**

Esta guía nace a partir del diálogo colaborativo sostenido con dirigentes y personal técnico del Área Natural Protegida, quienes manifestaron la necesidad de contar con herramientas prácticas para fortalecer el manejo post-incendio. Tras una revisión exhaustiva de los planes de manejo vigentes, se identificó una carencia de lineamientos y metodologías orientadas a la evaluación y seguimiento en la etapa post-incendio.

Con base en experiencias y estudios propios, se desarrollaron estas recomendaciones con el objetivo de brindar una base sólida y accesible para realizar estudios y monitoreos post-incendio, especialmente en contextos donde los recursos y la experiencia técnica pueden ser limitados.

El propósito es que, en el futuro, el personal del Área Natural Protegida pueda aprovechar de manera más eficiente los recursos que se destinen a la gestión post-incendio, sin necesidad de ser expertos en la materia, y que esta guía sirva como una herramienta que facilite la toma de decisiones informadas para la conservación y recuperación de los ecosistemas afectados.

## **Alcance y adaptabilidad**

Aunque esta guía fue desarrollada específicamente para el contexto ecológico, logístico y administrativo del Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir, su estructura y enfoque pueden adaptarse con relativa facilidad a otros ecosistemas templado-mediterráneos con historia de fuego. Esto incluye regiones cercanas como la Sierra de Juárez, así como áreas del sur de California que comparten características ambientales y dinámicas de perturbación similares. Además, ciertos elementos metodológicos pueden ser de utilidad para otras regiones interesadas en establecer protocolos de monitoreo post-fuego, especialmente en contextos de conservación o manejo adaptativo dentro de áreas naturales protegidas.

## Introducción

El fuego es un elemento que ha desempeñado un papel paradójico en los ecosistemas a lo largo del tiempo. Aunque históricamente ha funcionado como un agente natural de renovación ecológica, en las últimas décadas su frecuencia e intensidad han aumentado de forma preocupante, impulsadas principalmente por el cambio climático, la expansión de la interfaz urbano-forestal y la supresión prolongada del fuego (Bowman *et al.*, 2009; Westerling *et al.*, 2006; Flannigan *et al.*, 2009). Esta nueva era de incendios más severos y extensos —conocida como el piroceno (Pyne, 2016)— obliga a repensar el papel del fuego en el manejo de los ecosistemas, ya que su presencia está destinada a quedarse. Ante este escenario, tanto los sistemas ecológicos como los marcos de gestión deben adaptarse a una nueva realidad donde el fuego es una perturbación persistente (Stephens *et al.*, 2013; Moreira *et al.*, 2020). La vida, como lo ha hecho desde sus orígenes, continúa respondiendo y adaptándose a este fenómeno, aunque las condiciones actuales imponen nuevos retos ecológicos y sociales (Kozlowski & Ahlgren, 1974; Keeley *et al.*, 2011; Pausas & Keeley, 2014).

Los incendios forestales son un componente natural de los ecosistemas saludables y dinámicos (Bond *et al.*, 2012; Arkle y Pilliod, 2010). Tienen un papel crucial en el reciclaje de nutrientes que, de otra manera, el detritus tardaría cientos o incluso miles de años en liberar (Liao *et al.*, 2013; Marañón-Jiménez *et al.*, 2010; Cheng *et al.*, 2023). Además, los incendios generan mosaicos de diversidad, promueven la salud del ecosistema y contribuyen a la eliminación de enfermedades y plagas perjudiciales (Simler-Williamson *et al.*, 2021; Parker *et al.*, 2006; Fettig *et al.*, 2022). Estos eventos también generan paisajes en mosaico, compuestos por parches de diferente edad y estructura, lo que favorece la heterogeneidad ambiental y permite la coexistencia de múltiples especies con distintos requerimientos ecológicos (Turner, 2010; Hessburg *et al.*, 2005). Esta variabilidad espacial promueve procesos de selección natural, donde las especies mejor adaptadas a condiciones post-fuego pueden prosperar, aumentando así su aptitud (fitness) y resiliencia poblacional (Pausas & Keeley, 2009; Schwilck & Ackerly, 2005). Como resultado, se potencia la diversidad de flora y fauna en el largo plazo, especialmente en ecosistemas que han coevolucionado con el fuego (Bond & Keeley, 2005).

Sin embargo, no todos los impactos de un incendio son constructivos. Es cierto que pueden superar la capacidad de carga de un hábitat o incluso de todo el ecosistema, alterando sus cualidades fundamentales (Busby *et al.*, 2024; Boer & Bradstock 2020). En algunos casos, los incendios pueden provocar cambios tan drásticos que un ecosistema forestal se transforme significativamente a través de procesos de sucesión ecológica. Por ejemplo, Quintero-Gradilla *et al.* (2019) documentaron en la Sierra de Manantlán, Jalisco, cómo áreas de bosque mesófilo de montaña afectadas por incendios recurrentes pasaron a estar dominadas por vegetación secundaria arbustiva, lo cual representa un cambio importante en la estructura y composición del hábitat. Además, los incendios pueden erosionar el suelo, modificar las condiciones climáticas locales e incluso deteriorar de forma irreversible un espacio, impidiendo que vuelva a ser lo que era (Rosero 2013; González *et al.*, 2014; Parra-Lara *et al.*, 2010).

En este contexto, evaluar la severidad del fuego después de los incendios forestales es fundamental, ya que este indicador permite estimar el impacto ecológico sobre la vegetación, el suelo y la fauna, así como guiar estrategias de restauración y manejo adaptativo (Keeley, 2009; Morgan *et al.*, 2001). Esta guía busca proporcionar un marco sencillo y accesible para el monitoreo acústico de aves en áreas afectadas por incendios, ofreciendo herramientas que apoyen un manejo integral del fuego. Su propósito es facilitar que gestores, técnicos y otros actores tomen decisiones informadas basadas en evidencia científica, fortaleciendo así la resiliencia de los ecosistemas frente a la creciente incidencia de incendios forestales.

## **Objetivos**

### *General*

Elaborar una guía práctica de monitoreo acústico post-incendio para aves, sustentada en evidencia de campo, con aplicaciones en la gestión de áreas naturales protegidas.

### *Particulares*

- Proporcionar un protocolo accesible y replicable para el monitoreo acústico de aves en áreas post-incendio, que facilite su implementación por el personal de áreas naturales protegidas con diversos niveles de experiencia.

- Establecer lineamientos claros para la generación y validación de mapas de severidad de incendio, que sirvan como base para el diseño del muestreo de avifauna.
- Definir criterios y procedimientos para la selección y colocación de grabadoras acústicas en campo, asegurando la representatividad y calidad de los datos recolectados.
- Facilitar la recolección sistemática de datos acústicos para evaluar la respuesta de las comunidades de aves a distintos grados de severidad del fuego y su evolución temporal.
- Recomendar metodologías de análisis de datos acústicos, incluyendo herramientas automatizadas y criterios de depuración, para optimizar la identificación de especies y la interpretación de resultados.
- Orientar sobre enfoques estadísticos apropiados para evaluar cambios en la presencia y abundancia de especies, considerando variables temporales y espaciales.
- Promover la generación de información que contribuya a fortalecer los planes de manejo post-incendio, facilitando la toma de decisiones basadas en evidencia científica.
- Fomentar la integración de conocimientos ecológicos y sociales para mejorar la gestión adaptativa y sostenible de las áreas naturales protegidas afectadas por incendios.

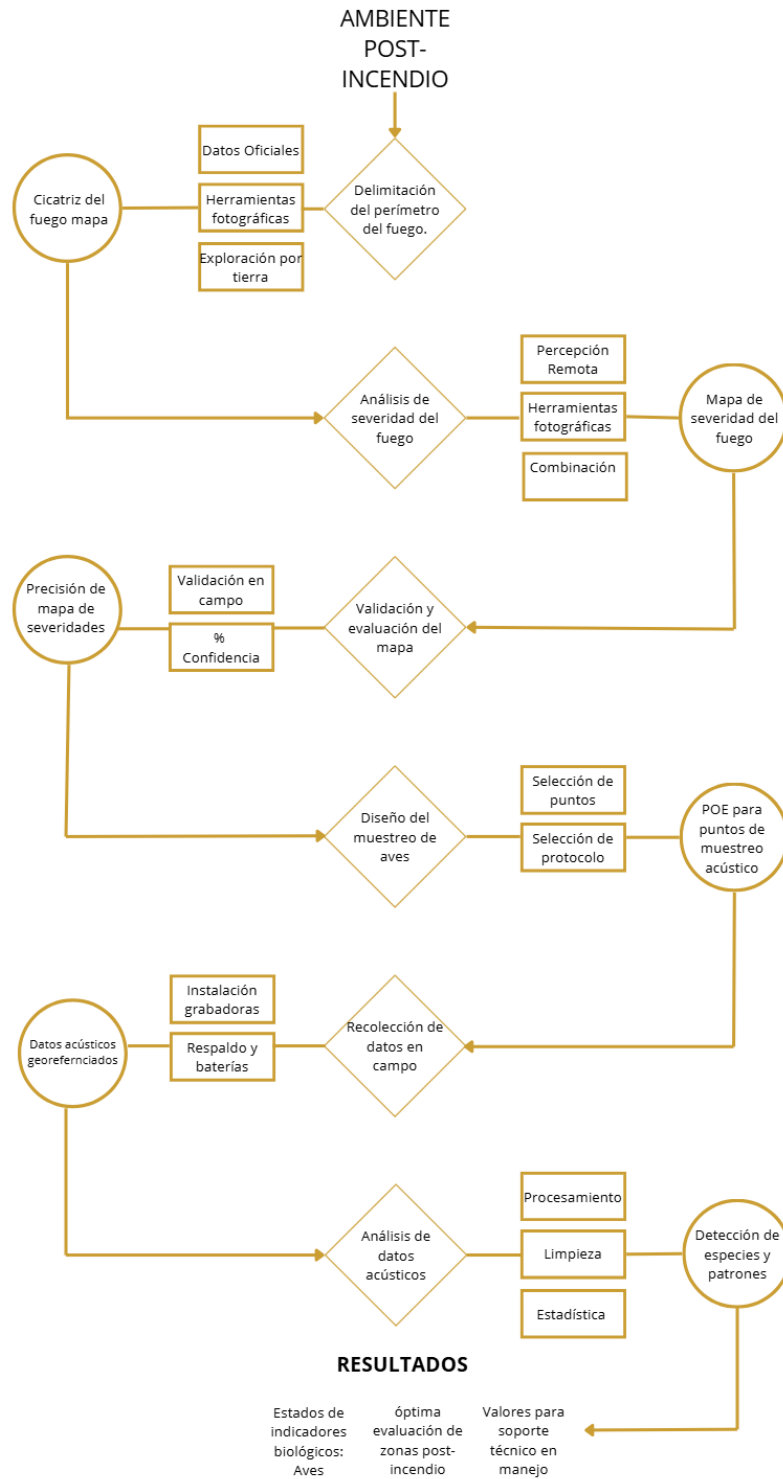
### **Metodología de Evaluación**

Para la elaboración de esta guía no se partió de un marco metodológico predeterminado, sino que su diseño fue resultado de una construcción contextual y colaborativa, orientada a la utilidad práctica para el personal del Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir. El proceso inició a partir de los resultados obtenidos en el estudio de campo, que permitieron identificar patrones ecológicos relevantes y necesidades operativas. Posteriormente, se sostuvo un diálogo directo con la dirección del parque para identificar fortalezas, limitaciones y vacíos en los esquemas actuales de monitoreo, lo que permitió delinear un enfoque adaptado a su realidad institucional.

A partir de ello, se estableció una propuesta estructurada orientada a usuarios técnicos y operativos, con énfasis en:

- (1) la selección representativa de sitios según severidad del fuego,
- (2) la estandarización del muestreo acústico de avifauna,
- (3) el registro de variables contextuales mínimas, y
- (4) pautas básicas para la interpretación ecológica de los datos.

La metodología, aunque no formalizada como tal, puede ser replicable para el diseño de guías enfocadas a otros grupos biológicos, siempre que se parta de los principios clave que guiaron esta propuesta: observación empírica, diálogo con usuarios finales y adecuación al contexto operativo de conservación. La figura 1 muestra un diagrama de flujo que sintetiza las etapas fundamentales del protocolo para el monitoreo post-incendio con enfoque acústico en aves. En este esquema se representan de manera secuencial y ordenada los principales procesos, iniciando con la generación y validación del mapa de severidad, seguido por el diseño del muestreo acústico, la recolección de datos en campo, el análisis estadístico de la información obtenida y finalmente la interpretación de los resultados esperados. Este diagrama facilita la comprensión global del procedimiento y sirve como referencia visual para orientar a los usuarios en la correcta aplicación de la guía.



**Figura 1.** Diagrama de flujo con las etapas clave del protocolo para monitoreo acústico post-incendio.

\*POE: Protocolo Operativo Estandarizado.

### ***A. Delimitación del perímetro del incendio***

El primer paso para realizar un análisis post-incendio en un área de interés consiste en delimitar con precisión el perímetro del incendio, también conocido como la cicatriz del incendio (Nioti *et al.*, 2011; Hardtke *et al.*, 2015; Peng Lui *et al.*, 2023). Este perímetro es fundamental para definir el área que será evaluada y monitoreada. Aquí presentamos tres métodos principales para obtener esta información:

1. *Consulta de fuentes oficiales.* Se recomienda verificar si existen datos oficiales sobre el incendio en cuestión. Dependencias como la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) <https://forestales.ujed.mx/incendios2/>, la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), y la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) <http://incendios.conabio.gob.mx/> pueden contar con registros, mapas, o reportes de incendios recientes que incluyan el perímetro afectado.
2. *Uso de técnicas de percepción remota como herramientas fotográficas.* En caso de no contar con información oficial, se puede recurrir a herramientas de percepción remota, como imágenes satelitales (por ejemplo, de *Sentinel-2* o *Landsat*), fotografías aéreas obtenidas por drones —con resolución espacial recomendada de al menos 10 cm/píxel y vuelos a una altitud aproximada de entre 50 y 120 m, dependiendo del objetivo— o sensores instalados en helicópteros. Estas imágenes permiten identificar visualmente el área quemada, y con el apoyo de software de análisis geoespacial (como *QGIS* o *Google EarthEngine*, *ArcMap*), se puede trazar el perímetro de manera relativamente precisa.
3. *Exploración por tierra, delimitación en campo.* Cuando no hay acceso a datos oficiales ni a imágenes de calidad, es posible realizar una delimitación manual directamente en el terreno. Esto implica recorrer el borde del área quemada y registrar el trazo con un dispositivo *GPS* o aplicaciones móviles de georeferenciación. Este método es más demandante, pero útil en áreas pequeñas o de difícil acceso para sensores remotos.

Cualquiera que sea el método utilizado —idealmente una combinación de los tres para mayor precisión—, el resultado debe ser un mapa con el perímetro del incendio, que servirá como base

para las siguientes etapas del análisis post-incendio.

### ***B. Análisis de severidad del fuego***

Una vez delimitado el perímetro del incendio (cicatriz del fuego), el siguiente paso es evaluar la severidad del incendio dentro del área afectada (Güney *et al.*, 2023; Holsinger *et al.*, 2022; White & Gibson 2022). Esta etapa consiste en identificar y clasificar el grado de daño causado por el fuego a la vegetación y al suelo, y representarlo espacialmente mediante un mapa de severidad.

#### *Importancia de la severidad*

La severidad del incendio es una variable clave, ya que permite entender la intensidad del impacto ecológico en distintas zonas del área quemada (Lentile *et al.*, 2006; Morgan *et al.*, 2014; Parsons *et al.*, 2010). La forma en que se clasifica esta severidad dependerá del enfoque del estudio, los objetivos de manejo, y las necesidades de quienes utilizarán la información (por ejemplo, para restauración, monitoreo ecológico o evaluación legal).

#### *Métodos para determinar la severidad*

Se recomienda contar con el apoyo de una persona con experiencia técnica en temas ambientales, manejo del fuego o sistemas de información geográfica. Para generar el mapa, pueden emplearse diferentes métodos:

1. *Consulta de fuentes oficiales.* Se recomienda verificar si existen datos oficiales sobre el incendio en cuestión. Dependencias como la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) <https://forestales.ujed.mx/incendios2/>, la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), y la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) <http://incendios.conabio.gob.mx/> pueden contar con registros, mapas, o reportes de incendios recientes que incluyan el perímetro afectado.
- 2.
3. *Uso de técnicas de percepción remota como herramientas fotográficas.* La percepción remota es una herramienta clave en estudios post-incendio, ya que permite detectar cambios en la cobertura vegetal mediante el análisis de imágenes satelitales o fotografías aéreas obtenidas por drones o sensores. A través del procesamiento digital de estas

imágenes, es posible identificar diferencias en el estado de la vegetación antes y después del incendio.

Estas imágenes pueden clasificarse mediante técnicas como la clasificación supervisada y el análisis de índices espectrales de severidad (por ejemplo, el dNBR o el RdNBR), los cuales cuantifican la severidad del fuego en función de la reflectancia del dosel y el sotobosque. Existen metodologías estandarizadas como las desarrolladas por el programa MTBS (*Monitoring Trends in Burn Severity*; <https://www.mtbs.gov/mapping-methods>), que ofrecen lineamientos técnicos para la generación de mapas de severidad a partir de sensores como *Landsat*.

Además, recientemente se han desarrollado flujos de trabajo automatizados utilizando plataformas como *Google Earth Engine* (GEE), que permiten generar mapas de severidad de manera reproducible, eficiente y a gran escala. Por ejemplo, Qiu *et al.* (2019) presentan un enfoque para la creación automática de mapas de severidad postincendio mediante GEE, lo que representa una alternativa accesible para investigadores con conocimientos básicos en programación geoespacial (<https://www.mdpi.com/2072-4292/11/14/1735>).

4. *Trabajo de campo*. Cuando no se cuenta con imágenes adecuadas o para complementar el análisis remoto, se puede realizar una evaluación directa en el sitio. Esto implica observar y registrar características como el grado de combustión de la vegetación, el ennegrecimiento del suelo, la pérdida de hojarasca o la afectación a troncos y ramas. Esta información puede georeferenciarse y utilizarse como referencia para entrenar los algoritmos de clasificación en una metodología combinada.

#### *Categorización de la severidad*

Existen distintas escalas y enfoques para clasificar la severidad del fuego, que van desde evaluaciones cualitativas simples hasta modelos cuantitativos complejos. En un contexto práctico, se recomienda utilizar al menos tres categorías principales, las cuales pueden adaptarse según el ecosistema y los objetivos del estudio. Una forma de estandarizar estas categorías,

ampliamente utilizada en estudios post-incendio, es con base en el porcentaje de mortalidad del dosel arbóreo, así como la pérdida de área basal:

- *Alta severidad*: más del 75% de mortalidad del dosel; pérdida casi total de vegetación; suelos expuestos, con señales de combustión profunda (por ejemplo, raíces o mantillo completamente consumidos).
- *Severidad media*: 26–75% de mortalidad del dosel; vegetación parcialmente quemada, con cobertura orgánica del suelo aún presente en algunas zonas.
- *Baja severidad*: hasta un 25% de mortalidad del dosel; afectación superficial, manteniendo buena parte de la vegetación viva y sin daños graves al suelo.

Esta clasificación está basada en el trabajo de Miller *et al.* (2009), quienes desarrollaron un marco útil para interpretar imágenes satelitales y validarlas en campo en bosques del oeste de Estados Unidos. Aunque el umbral exacto de cada clase puede ajustarse según el ecosistema local, utilizar rangos cuantitativos como estos facilitan la comparación entre estudios y la interpretación de los datos de percepción remota.

### ***C. Validación y evaluación del mapa***

Una vez creado el mapa de severidad del área afectada por el incendio, es fundamental validar su precisión en campo (Key & Benson, 2006; Morgan *et al.*, 2014). Esta validación permite asegurar la confiabilidad de la información para el seguimiento ecológico y, en caso necesario, ajustar los métodos utilizados en la clasificación.

A continuación, se describen los pasos clave para realizar esta validación:

- *Selección de puntos aleatorios*. Seleccione aleatoriamente puntos dentro de cada categoría de severidad (por ejemplo, baja, media y alta) distribuidos por todo el polígono afectado. Se recomienda un mínimo de 10 puntos por categoría, idealmente aumentando a 20 o más si los recursos lo permiten, para asegurar una evaluación más representativa.

- *Trabajo de campo.* Visite cada punto seleccionado y evalúe la condición real del sitio, registrando indicadores cuantificables de severidad. Se recomienda utilizar uno de los siguientes métodos, según los recursos disponibles:

Índice Compuesto de Severidad del Fuego (CBI): integra múltiples capas del ecosistema (dosel, sotobosque, suelo) y proporciona una escala de severidad continua, útil para vincular con índices satelitales como el RdNBR. El protocolo de evaluación de CBI se encuentra en Key & Benson (2006).

Pérdida porcentual de cobertura de dosel o área basal: método más sencillo y directo, que clasifica la severidad según la mortalidad del dosel o la pérdida de biomasa leñosa. Por ejemplo, baja severidad (<25% de pérdida), media (26–75%), y alta severidad (>75%) según Miller *et al.* (2009). Este enfoque es común en estudios forestales y facilita la comparación con mapas remotos.

También es importante considerar el tiempo transcurrido desde el incendio, ya que esto puede alterar la apariencia del sitio.

- Registro en campo y validación del mapa. Compare la severidad observada en campo con la clasificada en el mapa para cada punto. Registre si coinciden o no, y anote observaciones que puedan ayudar a mejorar futuras clasificaciones.
- Cálculo de porcentaje de confiabilidad. Calcule el nivel de concordancia entre el mapa y los datos de campo con la siguiente fórmula:

$$\text{Porcentaje de confiabilidad (\%)} = (\text{Número de puntos clasificados correctamente} / \text{Total de puntos validados}) \times 100$$

- *Interpretación y ajustes.* Si es posible, utilice esta validación para ajustar los umbrales o métodos de clasificación del mapa de severidad.

Si no es factible realizar cambios, asegure dejar documentado el nivel de confiabilidad obtenido y sus posibles limitaciones, para un uso informado del producto cartográfico. Este proceso incrementa la utilidad y solidez del mapa de severidad como herramienta de planificación y monitoreo en la etapa post-incendio.

#### ***D. Diseño del muestreo acústico de aves***

Pasos sugeridos para el muestreo acústico post-incendio

1. Seleccionar sitios representativos de cada categoría de severidad (alta, media-baja y no quemado), con base en un mapa de severidad reciente.
2. Confirmar en campo que cada punto sea accesible y representativo, evitando bordes entre categorías.
3. Espaciar las grabadoras al menos 500 metros entre sí para asegurar la independencia estadística de las muestras y evitar la pseudoreplicación. Esta distancia se basa en recomendaciones ecológicas para minimizar la detección de las mismas aves por múltiples grabadoras y asegurar que cada punto de muestreo represente una unidad ecológica distinta (Ralph *et al.*, 1995; MacKenzie & Royle, 2005).
4. Usar grabadoras automáticas resistentes al clima (por ejemplo, *Song Meter Mini 2* o SM3).
5. Montar los micrófonos a una altura de entre 1.3 y 1.5 metros sobre el suelo.
6. Programar las grabaciones desde 30 minutos antes del amanecer náutico hasta 3 horas después del amanecer, periodo conocido como "coral matutino" o *dawn chorus*, cuando ocurre el mayor pico de actividad vocal en la mayoría de las especies de aves. Este intervalo concentra la mayor riqueza y abundancia de cantos, lo que lo hace óptimo para capturar la mayor diversidad avifaunística en el menor tiempo posible (Staicer *et al.*, 1996; Furnas & Callas, 2015).
7. Repetir el muestreo durante al menos 20 días por temporada: primavera, verano, otoño e invierno.
8. Incluir puntos de control en zonas no quemadas pero ecológicamente comparables.

Aunque existen especies crepusculares y nocturnas que también son importantes bioindicadores, este protocolo se enfoca en las comunidades de aves diurnas, ya que representan

la mayoría de la avifauna del bosque templado y son más sensibles a cambios estructurales post-incendio detectables mediante monitoreo pasivo en este periodo (Blumstein *et al.*, 2011). Para estudios enfocados en especies nocturnas, se recomienda complementar el diseño con sesiones específicas en horarios vespertinos o nocturnos.

En particular, las aves diurnas son excelentes indicadores del estado de los hábitats por su alta sensibilidad a los cambios ambientales y su diversidad funcional, lo que permite obtener datos valiosos para distintos tipos de estudios ecológicos (Darras *et al.*, 2018; Sugai *et al.*, 2018; Shonfield & Bayne, 2017). Con base en estas cualidades, el protocolo propuesto para el seguimiento post-incendio plantea la implementación de un muestreo acústico pasivo, como herramienta efectiva para evaluar los efectos del fuego sobre la estructura y composición de las comunidades de aves del bosque.

#### *¿Por qué muestreo acústico?*

El uso de grabadoras acústicas automáticas facilita la recolección de datos sin necesidad de contar con expertos presentes en campo todo el tiempo, lo cual puede ser complejo y costoso. Estas unidades permiten obtener registros de la comunidad de aves de manera continua y sin sesgos asociados a la observación directa.

#### *Equipos recomendados:*

Sugerimos utilizar grabadoras diseñadas para campo, que resistan la intemperie y condiciones adversas. Una opción recomendada es la marca *Wildlife Acoustics* (<https://www.wildlifeacoustics.com>), aunque actualmente existen varias alternativas en el mercado con características similares. Lo importante es asegurar que el equipo sea robusto para uso exterior.

#### *Distribución y ubicación de las grabadoras:*

- Se recomienda instalar al menos dos grabadoras por cada categoría de severidad del mapa (por ejemplo, dos en zonas de severidad alta, dos en media, etc.). Sin embargo, si el número de grabadoras disponibles es limitado por cuestiones presupuestales, se puede optar por rotar los equipos entre sitios. En ese caso, se sugiere mantener cada grabadora en un sitio

durante al menos dos semanas durante la temporada reproductiva. Esto permite obtener datos representativos sin necesidad de contar con un equipo por sitio. Por ejemplo, si se desea muestrear tres niveles de severidad más un nivel no quemado, se podrían utilizar cuatro unidades que se roten estratégicamente a lo largo de la temporada para cubrir múltiples sitios dentro de cada categoría.

- Las grabadoras deben colocarse separadas al menos 500 metros para asegurar independencia espacial de las muestras y evitar autocorrelación en la detección acústica (Digby *et al.*, 2013; Kéry *et al.*, 2010).
- La coordenada de muestreo debe estar rodeada por al menos 150 a 250 metros de terreno homogéneo con la misma categoría de severidad para evitar sesgos derivados de zonas de transición entre clases (Mueller-Dombois & Ellenberg, 1974).
- Siempre que sea posible, colocar las grabadoras en el interior de las zonas representativas de severidad y no en sus bordes (fronteras) entre clases de severidad. Debe ser homogéneo en estructura y grado de severidad del área seleccionada (Rivera-Huerta *et al.*, 2016).
- La selección inicial de los puntos se hará con base en el mapa de severidad, pero es fundamental realizar una visita previa al campo para corroborar la accesibilidad del sitio y confirmar que la ubicación es viable (por ejemplo, evitar lugares inaccesibles como riscos o zonas peligrosas).

#### *Consideración del bosque como control:*

Es indispensable incluir también puntos de muestreo en el bosque no afectado cercano al perímetro del incendio, para que sirvan como referencia o control en el estudio. Este bosque debe ser lo más similar posible al afectado en términos de tipo de vegetación y microhábitats, sin cambios significativos en el piso vegetal o estructura. Recomendamos seleccionar estos puntos a al menos 500 metros del perímetro del fuego para minimizar influencias indirectas.

### *Montaje de las grabadoras:*

El micrófono debe instalarse a una altura mínima de entre 1.3 y 1.5 metros del suelo, para optimizar la captura de sonidos de aves diurnas y minimizar el ruido de fondo. Es importante evitar ubicar la grabadora cerca de superficies que reflejen el sonido, como rocas grandes, paredes lisas o troncos macizos, ya que estas pueden generar ecos o distorsiones que interfieren con la calidad del audio y dificultan la identificación automática de las especies. (Se sugiere revisar recomendaciones adicionales sobre montaje según el modelo específico del equipo).

### *Protocolo de muestreo acústico:*

- Se recomienda que la grabación comience al menos 30 minutos antes del amanecer náutico y continúe por un periodo mínimo de 1 hora después del amanecer. Este intervalo cubre el pico de actividad vocal de muchas especies de aves y proporciona una representación adecuada de la diversidad diurna. En caso de contar con suficiente capacidad de batería y almacenamiento, se puede extender la grabación hasta 3 horas después del amanecer para capturar una mayor variación en la actividad de la comunidad.
- Es importante considerar la duración de la batería y la capacidad de almacenamiento de la memoria de las grabadoras para planificar recambios y respaldos si es necesario.
- Se recomienda realizar el muestreo durante un mínimo de 20 días en cada temporada estacional (primavera, verano, otoño e invierno) para captar las variaciones temporales en la comunidad de aves. Sin embargo, si el tiempo o los recursos del equipo son limitados, se puede enfocar el muestreo solo en una o dos estaciones clave, como primavera y verano, especialmente si el objetivo principal es monitorear la actividad reproductiva o las especies migratorias.

### *Flexibilidad del protocolo:*

El diseño propuesto es una guía general para estudios de seguimiento post-incendio. Los usuarios pueden adaptarlo según sus objetivos específicos, incluyendo otras metodologías como conteos por puntos o avistamientos si cuentan con expertos y recursos suficientes.

### ***E. Recolección de datos en campo***

Esta etapa se enfoca en la implementación práctica del diseño de muestreo previamente descrito. A continuación, se presentan las consideraciones clave para asegurar una recolección de datos ordenada, funcional y útil para el análisis posterior:

#### *1. Preparación previa:*

- Confirmar el funcionamiento de los equipos (baterías cargadas, memoria suficiente, configuración correcta).
- Imprimir o cargar en GPS las coordenadas seleccionadas.
- Revisar condiciones climáticas y de accesibilidad del sitio.

#### *2. Montaje y verificación de grabadoras:*

- Instalar el micrófono a al menos 1.30 m del suelo, orientado adecuadamente y lejos de obstáculos (ramas, troncos).
- Asegurar que la grabadora esté fija y protegida (por ejemplo, con carcasa o cubierta contra lluvia).
- Verificar que esté grabando antes de dejarla en el sitio.

#### *3. Registro de información del punto:*

- Anotar: coordenadas GPS exactas, fecha, hora de instalación, condiciones del clima, tipo de vegetación, nivel de severidad del sitio y observaciones generales del entorno (por ejemplo, si se escuchan ruidos humanos, si hay mucha cobertura arbórea, etc.).

#### *4. Revisión periódica (si aplica):*

- Programar visitas de revisión si el tiempo de muestreo supera la duración de la batería o la capacidad de la memoria.
- Llevar baterías/memorias de repuesto y herramientas básicas.

#### *5. Recolección del equipo:*

- Anotar la fecha y hora exactas de retiro.
- Verificar que la información grabada esté intacta antes de abandonar el sitio (si es posible).
- Guardar y respaldar los archivos en cuanto sea posible.

**Tabla I.** Lista de materiales, equipo y software recomendados para el trabajo de campo y análisis acústico post-incendio.

Categoría	Elemento / Herramienta	Descripción / Uso específico
Equipo de grabación	Grabadoras automáticas (ej. SM3, Song Meter Mini 2)	Captura de sonido ambiental durante varias horas.
	Micrófonos incorporados o externos	Asegurar buena calidad de grabación, resistentes a intemperie.
	Baterías recargables o alcalinas	Alimentación de las grabadoras durante los periodos de muestreo.
	Tarjetas SD o microSD de alta capacidad	Almacenamiento de los archivos de audio.
Montaje y fijación	Soportes, estacas o cintas resistentes	Fijación segura de la grabadora al sitio de muestreo.
	Cubiertas impermeables / carcasas protectoras	Protección contra lluvia, polvo o fauna silvestre.
	Taladro portátil o manual y tornillos (chilillos)	Montaje en árboles o superficies duras cuando no se pueden usar amarres.
	Straps / cinchos ajustables (tipo velcro o nylon)	Alternativa no invasiva para sujetar las grabadoras a troncos sin dañarlos.
Navegación y localización	GPS de mano o aplicación móvil con mapas offline	Localización precisa de puntos de muestreo en campo.
	Mapas impresos del área de estudio	Respaldo visual del plan de muestreo.
	Coordenadas pre-cargadas en GPS	Facilitan el traslado a los sitios específicos.
Registro en campo	Cuaderno de campo o plantillas digitales	Anotar datos esenciales del sitio: coordenadas, clima, observaciones, etc.
	Lápiz, bolígrafo resistente al agua	Para condiciones húmedas o con riesgo de lluvia.
	Cámara o celular con buena cámara	Documentar visualmente las condiciones del sitio.
Revisión y respaldo	Laptop o tableta	Revisión preliminar de grabaciones en campo (si es posible).
	Disco duro externo o nube	Respaldo de datos inmediatamente después del retiro de equipo.
Software recomendado	<a href="https://www.audacityteam.org/">Audacity (https://www.audacityteam.org/)</a>	Revisión y edición básica de audio.
	Kaleidoscope (Wildlife Acoustics)	Visualización de espectrogramas, detección automática de llamadas de aves.
	Raven Lite / Raven Pro (Cornell Lab of Ornithology)	Análisis acústico avanzado, anotación manual de eventos sonoros.
	QGIS o ArcGIS	Visualización y análisis espacial de puntos de muestreo y mapas de severidad.
	R (con paquetes como 'vegan', 'seewave', 'tuneR')	Análisis estadístico y procesamiento acústico.

### ***F. Análisis de datos acústicos***

El análisis de los datos recolectados es una etapa fundamental para interpretar el efecto del incendio sobre la comunidad de aves y, por lo tanto, para la toma de decisiones en el manejo del área. Dado que el procesamiento de grandes cantidades de grabaciones acústicas puede ser complejo y técnico, recomendamos contar con la colaboración de personal académico, investigadores, estudiantes o pasantes familiarizados con estas herramientas. Esto facilitará el manejo de los datos y reducirá la curva de aprendizaje para los responsables del seguimiento.

#### *Software recomendado:*

Sugerimos utilizar *Raven Pro*, un programa de análisis acústico que es gratuito para uso académico y cuenta con numerosos tutoriales en línea que facilitan su aprendizaje. Este software permite manejar grandes volúmenes de audio y ofrece herramientas para la clasificación y análisis de vocalizaciones.

### *Clasificación de cantos:*

Debido a que cada día pueden registrarse cientos de cantos en las grabaciones, el análisis manual puede ser inviable. Por ello, recomendamos emplear la clasificación supervisada que ofrece *Raven Pro*, basada en el modelo *BirdNet Global 6K*. Para filtrar resultados, se utiliza un intervalo de confianza del 50 % o superior, umbral comúnmente empleado en estudios acústicos para balancear la detección de verdaderos positivos y la reducción de falsos positivos (Kahl *et al.*, 2021). Un umbral más alto reduce las clasificaciones falsas y minimiza la necesidad de validación manual, aunque podría dejar fuera algunas detecciones débiles. Cabe destacar que *BirdNet Global 6K* ha demostrado eficacia en el reconocimiento automático de vocalizaciones en ambientes similares (Schneider *et al.*, 2020).

Aunque *BirdNet* ya cuenta con modelos regionalizados para diversas áreas, para mejorar la precisión en la identificación de especies locales es recomendable entrenar o adaptar el modelo con listados específicos del área de estudio. Esto puede parecer complejo para quienes no tienen experiencia previa con herramientas como *Raven Pro* o *BirdNet*.

Para facilitar este proceso, se recomienda seguir guías y documentación especializada. Por ejemplo, *BirdNet* ofrece recursos y tutoriales en su repositorio oficial de *GitHub* (<https://github.com/kahst/BirdNET>), donde se explica cómo preparar listas de especies locales y cómo entrenar el modelo con nuevos datos. Además, *Raven Pro* incluye herramientas para cargar bibliotecas personalizadas de sonidos y crear clasificadores supervisados, detallado en su manual de usuario (<https://ravensoundsoftware.com/manual/>).

En resumen, aunque requiere cierto nivel técnico, existen recursos accesibles que pueden guiar paso a paso este proceso de personalización para optimizar la detección y clasificación automática de vocalizaciones en estudios de campo.

### *Resultados y depuración:*

El producto del análisis serán archivos de texto que indican los tiempos en que se detectaron cantos en las grabadoras. Posteriormente, es necesario realizar una revisión cuidadosa para eliminar falsos positivos y registros de especies que no coincidan con la distribución geográfica

del área de estudio. Esta depuración implica escuchar fragmentos de audio para corroborar la identificación.

*Análisis estadístico:*

Para interpretar los datos, se debe explorar la información a través de tablas de atributos y determinar las mejores variables para comparar las categorías de severidad post-incendio. Es recomendable realizar pruebas de normalidad para elegir el análisis estadístico adecuado.

Dependiendo del objetivo del estudio, se pueden emplear pruebas como ANOVA, Kruskal-Wallis o análisis multivariados para evaluar diferencias entre categorías y relacionarlas con el grado de perturbación causado por el incendio.

*Análisis estadístico avanzado:*

Si el objetivo del usuario es analizar la fluctuación de especies entre diferentes categorías de severidad y estaciones del año, o explorar características específicas de las especies como gremios alimenticios, períodos de nidificación u otros aspectos ecológicos, es altamente recomendable contar con el apoyo de un especialista en estadística no paramétrica y modelación ecológica. Estos análisis suelen requerir métodos más complejos que van más allá de pruebas básicas y pueden incluir modelos multivariados, análisis de diversidad funcional, o series temporales. Contar con asesoría experta garantizará resultados confiables y adecuadamente interpretados.

***Ejemplo aplicado de análisis estadístico: estudio de caso con aves post-incendio***

Como referencia para quienes deseen implementar este protocolo, se presenta a continuación un ejemplo aplicado del análisis estadístico realizado en el estudio que dio origen a esta guía. El objetivo fue evaluar los efectos de la severidad del incendio y la estacionalidad en la riqueza de aves detectadas acústicamente en el Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir.

Se utilizó un modelo lineal generalizado con distribución binomial negativa (MLGbn), debido a la naturaleza de los datos de conteo y la presencia de sobredispersión. Las variables independientes fueron severidad del incendio (cuatro niveles: muy alta, alta, media-baja, no quemado) y estación del año (primavera y verano), además de su interacción. La variable

dependiente fue la riqueza de especies por punto de muestreo.

El análisis incluyó los siguientes pasos principales:

- *Preparación de los datos.* Los datos fueron organizados en un marco de datos (data frame) con columnas para la categoría de severidad, la estación del año, el número de especies detectadas por punto, y otras variables contextuales (fecha, ubicación, etc.).
- *Ajuste del modelo.* Se empleó el paquete *MASS* de R para ajustar el modelo con la función *glm.nb*, apropiada para datos de conteo con sobredispersión.
- Evaluación de significancia
- Se utilizaron análisis de varianza tipo II (*Anova* del paquete *car*) para identificar efectos significativos de las variables principales y su interacción.
- *Contrastes post hoc.* Para explorar diferencias específicas entre categorías de severidad y estaciones, se aplicaron contrastes posteriores mediante el paquete *emmeans*, con corrección por comparación múltiple. Esto permitió detectar qué combinaciones presentaban diferencias estadísticamente significativas.
- *Interpretación de efectos.* Los coeficientes del MLGbn se transformaron exponencialmente ( $\exp(\beta)$ ) para interpretarlos como cambios porcentuales en la riqueza de aves entre categorías. Esta transformación facilitó la comprensión ecológica y la comunicación de resultados a tomadores de decisiones.
- *Representación gráfica.* Finalmente, se generaron gráficos con *ggplot2* para ilustrar patrones de riqueza por severidad y estación, incluyendo intervalos de confianza.

Este enfoque permitió generar resultados sólidos y replicables, con aplicación directa en la gestión adaptativa post-incendio. Se recomienda que, en caso de no contar con experiencia en modelación estadística, el usuario trabaje en colaboración con un especialista en análisis de datos ecológicos, particularmente si desea aplicar modelos más complejos, como análisis multivariados, diversidad funcional o series temporales.

## **Resultados Esperados**

El monitoreo acústico de aves en áreas afectadas por incendios forestales permitirá evaluar el estado actual del ecosistema y comprender su trayectoria de recuperación ecológica a lo largo del tiempo. Al comparar la riqueza, abundancia y composición de especies entre zonas con distintos niveles de severidad del fuego y áreas no quemadas, se podrán identificar respuestas diferenciales de la avifauna ante el disturbio.

*Detección estacional de cambios en la riqueza y composición de especies.* La repetición del muestreo en distintas estaciones del año permitirá detectar cambios estacionales en la comunidad de aves, identificando periodos clave en los que ciertas especies colonizan, permanecen o desaparecen del hábitat afectado. Esta información es útil para caracterizar la dinámica temporal de la regeneración post-incendio.

*Identificación de especies indicadoras según la severidad del fuego.* El análisis detallado podrá revelar la presencia de especies indicadoras asociadas a diferentes niveles de severidad del incendio, tanto aquellas que son sensibles al disturbio como las que se benefician temporalmente de hábitats abiertos o alterados. Estas especies pueden funcionar como bioindicadores del estado del hábitat y orientar acciones de manejo.

*Construcción de una línea base para el seguimiento a largo plazo.* Este protocolo proporciona una línea base ecológica para futuras comparaciones ante nuevos eventos de fuego. La repetición periódica del muestreo permitirá evaluar trayectorias de recuperación o degradación a lo largo del tiempo, apoyando esquemas de monitoreo adaptativo y manejo basado en evidencia.

*Insumos para priorización de zonas de restauración.* Los resultados pueden identificar áreas críticas con baja riqueza o ausencia de especies clave, señalando sitios donde la regeneración natural es limitada. Esta información es útil para priorizar intervenciones de restauración activa como reforestación, control de especies invasoras o exclusión de ganado.

*Valor para la gestión, educación y gobernanza.* Desde una perspectiva social y de

gobernanza, este enfoque también puede:

- Fortalecer la participación comunitaria, al involucrar a actores locales en la recolección o interpretación de datos de biodiversidad.
- Generar evidencia útil para la gestión colaborativa, promoviendo decisiones compartidas entre comunidades, técnicos y autoridades.
- Impulsar la educación ambiental, mostrando de forma tangible los efectos del fuego y la capacidad de recuperación del ecosistema.
- Apoyar la rendición de cuentas institucional, ofreciendo indicadores verificables sobre el estado del ecosistema y el efecto de las acciones de manejo.

Se recomienda realizar el muestreo de manera anual durante los primeros años posteriores al incendio, dado que en este periodo se registran cambios ecológicos rápidos y significativos que requieren un seguimiento cercano para captar la dinámica inicial de recuperación (Hutto, 2008; DellaSala & Hanson, 2015). Posteriormente, una frecuencia de muestreo cada tres a cinco años puede ser suficiente para monitorear las tendencias a largo plazo una vez que la comunidad aviar se estabiliza. Es importante ajustar la intensidad y frecuencia del monitoreo según la severidad del fuego, priorizando una mayor cobertura en las áreas con severidad alta y muy alta, donde las alteraciones en la estructura y composición del ecosistema son más pronunciadas y los procesos de recuperación son más dinámicos (Nappi & Drapeau, 2009; Keeley, 2009). Además, la incorporación de muestreos estacionales es fundamental para reflejar la variabilidad en la riqueza y el comportamiento de las aves a lo largo del año, permitiendo captar patrones de uso temporal y migración (Sherry & Holmes, 1995; Ralph, Droege & Sauer, 1995). Finalmente, se recomienda revisar y actualizar periódicamente el protocolo de monitoreo para incorporar avances metodológicos y científicos, optimizando su efectividad y pertinencia en el contexto cambiante de la gestión ambiental (Lindenmayer & Likens, 2009; Yoccoz, Nichols & Boulinier, 2001).

### **Bibliografía especializada sobre ecología del fuego.**

Con el objetivo de fortalecer las capacidades técnicas del personal involucrado en la gestión post-incendio, esta sección presenta una selección de referencias clave en temas relacionados con la ecología del fuego. La bibliografía propuesta (Tabla II) abarca fundamentos ecológicos, adaptaciones de especies, regímenes de fuego, restauración de ecosistemas, interacciones entre fuego y avifauna, así como aspectos sociales y de gobernanza en torno al manejo del fuego.

Estos textos ofrecen un marco conceptual y práctico para comprender el papel ecológico del fuego en los ecosistemas, así como para diseñar estrategias de manejo más informadas y sostenibles. Se espera que esta recopilación sirva como base para el desarrollo de capacidades locales, el diseño de acciones de restauración, y la integración del conocimiento científico en la toma de decisiones dentro del “Programa de Manejo Integral del Fuego de la Región Mediterránea en las Áreas Naturales Protegidas: Parque Nacional Constitución de 1857 y Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir, Baja California, México”.

La selección incluye estudios relevantes tanto a nivel global como regional, y está orientada a facilitar el acceso a conceptos esenciales para personal técnico, investigadores, estudiantes y otros actores vinculados a la conservación y manejo adaptativo del territorio.

**Tabla II.** Bibliografía propuesta en manejo de fuego por categorías.

<b>Categoría</b>	<b>Referencia</b>
<b>Ecología del fuego</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bond, W. J., &amp; van Wilgen, B. W. (1996). <i>Fire and plants</i>. Dordrecht: Springer.</li> <li>• Pausas, J. G., &amp; Keeley, J. E. (2009). A burning story: The role of fire in the history of life. <i>Trends in Plant Science</i>, 14(8), 446–453. <a href="https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.06.005">https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.06.005</a></li> <li>• Sugihara, N. G., van Wagendonk, J. W., Shaffer, K. E., Fites-Kaufman, J., &amp; Thode, A. E. (2006). <i>Fire in California's ecosystems</i>. Berkeley: University of California Press.</li> <li>• Certini, G. (2005). Effects of fire on properties of forest soils: A review. <i>Oecologia</i>, 143(1), 1–10. <a href="https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8">https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8</a></li> <li>• Neary, D. G., Ryan, K. C., &amp; DeBano, L. F. (2005). <i>Wildland fire in ecosystems: Effects of fire on soils and water</i>. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42-vol. 4. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture.</li> <li>• Stephens, S. L., Skinner, C. N., &amp; Gill, S. J. (2003). Dendrochronology-based fire history of mixed conifer forests in the Sierra San Pedro Mártir, Mexico. <i>Forest Ecology and Management</i>, 178(1–2), 297–306. <a href="https://doi.org/10.1016/S0378-1127(03)00044-3">https://doi.org/10.1016/S0378-1127(03)00044-3</a></li> <li>• Evett, R. R., Franco-Vizcaíno, E., &amp; Stephens, S. L. (2007). Phytolith evidence for the absence of a prehistoric grass understory in a Jeffrey pine–mixed conifer forest in the Sierra San Pedro Mártir, Mexico. <i>Canadian Journal of Forest Research</i>, 37(3), 306–317. <a href="https://doi.org/10.1139/X06-248">https://doi.org/10.1139/X06-248</a></li> </ul> <p>Stephens, S. L., Collins, B. M., &amp; Biber, E. (2010). Fire history and fire scar formation in Jeffrey pine–mixed conifer forests, Sierra San Pedro Mártir, Mexico. <i>Forest Ecology and Management</i>, 260(3), 405–415. <a href="https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.04.021">https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.04.021</a></p>
<b>Adaptaciones de especies</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keeley, J. E., Pausas, J. G., Rundel, P. W., Bond, W. J., &amp; Bradstock, R. A. (2011). Fire as an evolutionary pressure shaping plant traits. <i>Trends in Plant Science</i>, 16(8), 406–411.</li> </ul>

Categoría	Referencia
	<p data-bbox="594 239 1166 275"><a href="https://doi.org/10.1016/j.tplants.2011.04.002">https://doi.org/10.1016/j.tplants.2011.04.002</a></p> <ul data-bbox="548 317 1448 1014" style="list-style-type: none"> <li data-bbox="548 317 1448 422">• Schwilk, D. W., &amp; Ackerly, D. D. (2001). Flammability and serotiny as strategies: Correlated evolution in pines. <i>Oecologia</i>, 126(4), 402–406. <a href="https://doi.org/10.1007/s004420100680">https://doi.org/10.1007/s004420100680</a></li> <li data-bbox="548 464 1448 642">• Stephens, S. L., &amp; Fry, D. L. (2005). Spatial distribution of regeneration patches in an old-growth <i>Pinus jeffreyi</i>–mixed conifer forest in northwestern Mexico. <i>Journal of Vegetation Science</i>, 16(6), 693–702. <a href="https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2005.tb02381.x">https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2005.tb02381.x</a></li> <li data-bbox="548 684 1448 831">• Dunbar-Irwin, M., &amp; Safford, H. D. (2016). Characterizing structural retention in burned conifer forests: Implications for resilience. <i>Forest Ecology and Management</i>, 377, 156–166. <a href="https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.06.031">https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.06.031</a></li> <li data-bbox="548 873 1448 1014">• Stephens, S. L. (2004). Fuel loads, snag density, and snag recruitment in an unmanaged Jeffrey pine–mixed conifer forest in northwestern Mexico. <i>Forest Ecology and Management</i>, 199(2-3), 103–113. <a href="https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.05.040">https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.05.040</a></li> </ul> <p data-bbox="594 1056 1422 1199">Stephens, S. L., &amp; Gill, S. J. (2005). Forest structure and fire history in mixed-conifer forests of the Sierra Nevada, California. <i>Forest Ecology and Management</i>, 215(1-3), 1–12. <a href="https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.03.070">https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.03.070</a>.</p> <ul data-bbox="548 1241 1448 1419" style="list-style-type: none"> <li data-bbox="548 1241 1448 1419">• Stephens, S. L., Shive, K. L., &amp; Franco-Vizcaíno, E. (2023). Climate and fire impacts on tree recruitment in a Jeffrey pine–mixed conifer forest in northwestern Mexico. <i>Forest Ecology and Management</i>, 531, 120851. <a href="https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120851">https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120851</a></li> </ul>
<b>Regímenes del fuego</b>	<ul data-bbox="548 1451 1448 1900" style="list-style-type: none"> <li data-bbox="548 1451 1448 1598">• Keeley, J. E., &amp; Fotheringham, C. J. (2001). History and management of crown-fire ecosystems: A summary and response. <i>Conservation Biology</i>, 15(6), 1561–1567. <a href="https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2001.00160.x">https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2001.00160.x</a></li> <li data-bbox="548 1640 1448 1787">• Turner, M. G., Romme, W. H., &amp; Tinker, D. B. (2003). Surprises and lessons from the 1988 Yellowstone fires. <i>Frontiers in Ecology and the Environment</i>, 1(7), 351–358. <a href="https://doi.org/10.1890/1540-9295(2003)001[0351:SALFTA]2.0.CO;2">https://doi.org/10.1890/1540-9295(2003)001[0351:SALFTA]2.0.CO;2</a></li> <li data-bbox="548 1829 1448 1900">• Fry, D. L., Stephens, S. L., &amp; Collins, B. M. (2014). Spatial complexity of fire regimes in frequent-fire forests of the western</li> </ul>

Categoría	Referencia
	<p data-bbox="581 239 1442 310">United States. <i>Ecological Applications</i>, 24(6), 1460–1476. <a href="https://doi.org/10.1890/13-1362.1">https://doi.org/10.1890/13-1362.1</a></p> <ul data-bbox="537 352 1442 1050" style="list-style-type: none"> <li data-bbox="537 352 1442 531">• Minnich, R. A., Barbour, M. G., Burk, J. H., &amp; Sosa-Rivera, S. (2000). Historical fire regimes and landscape patterns in the San Bernardino Mountains, California. <i>Ecological Applications</i>, 10(5), 1375–1390. <a href="https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[1375:HFRALP]2.0.CO;2">https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[1375:HFRALP]2.0.CO;2</a></li> <li data-bbox="537 573 1442 716">• Rivera-Huerta, A., Safford, H. D., &amp; Miller, J. D. (2016). Evaluación del severidad del fuego en ecosistemas forestales de México usando indicadores remotos. <i>Revista Mexicana de Ciencias Forestales</i>, 7(34), 68–80.</li> <li data-bbox="537 758 1442 867">• Skinner, C. N., Taylor, A. H., &amp; Bradshaw, G. A. (2008). Fire history and effects on forest structure in the Sierra Nevada. <i>Fire Ecology</i>, 4(2), 1–22. <a href="https://doi.org/10.4996/fireecology.0402001">https://doi.org/10.4996/fireecology.0402001</a></li> <li data-bbox="537 909 1442 1050">• Stephens, S. L., Collins, B. M., &amp; Biber, E. (2010b). Fire scar formation and historical fire regimes in conifer forests. <i>Canadian Journal of Forest Research</i>, 40(1), 1–12. <a href="https://doi.org/10.1139/X09-168">https://doi.org/10.1139/X09-168</a></li> </ul> <p data-bbox="581 1092 1442 1297">Stephens, S. L., &amp; Skinner, C. N. (2001). Fire history in mixed conifer forests of the Sierra San Pedro Mártir, Baja California, Mexico. In K. E. M. Galley &amp; T. P. Wilson (Eds.), <i>Proceedings of the Invasive Species Workshop: The Role of Fire in the Control and Spread of Invasive Species</i> (pp. 123–130). Tall Timbers Research Station.</p>
<p data-bbox="233 1556 457 1627"><b>Restauración de ecosistemas</b></p>	<ul data-bbox="537 1318 1442 1860" style="list-style-type: none"> <li data-bbox="537 1318 1442 1461">• D’Antonio, C. M., &amp; Vitousek, P. M. (1992). Biological invasions by exotic grasses, the grass/fire cycle, and global change. <i>Annual Review of Ecology and Systematics</i>, 23, 63–87. <a href="https://doi.org/10.1146/annurev.es.23.110192.000431">https://doi.org/10.1146/annurev.es.23.110192.000431</a></li> <li data-bbox="537 1503 1442 1570">• Biswell, H. H. (1989). <i>Prescribed burning in California wildlands vegetation management</i>. Berkeley: University of California Press.</li> <li data-bbox="537 1612 1442 1755">• Stephens, S. L., Collins, B. M., &amp; Biber, E. (2007). Fuel characteristics and fire behavior in mixed conifer forests. <i>Canadian Journal of Forest Research</i>, 37(3), 530–543. <a href="https://doi.org/10.1139/X06-252">https://doi.org/10.1139/X06-252</a></li> <li data-bbox="537 1797 1442 1860">• Dunbar-Irwin, M., &amp; Safford, H. D. (2016). Characterizing structural retention in burned conifer forests: Implications for</li> </ul>

Categoría	Referencia
	<p>resilience. <i>Forest Ecology and Management</i>, 377, 156–166. <a href="https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.06.031">https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.06.031</a></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Stephens, S. L., Shive, K. L., &amp; Franco-Vizcaíno, E. (2023). Climate and fire impacts on tree recruitment in a Jeffrey pine–mixed conifer forest in northwestern Mexico. <i>Forest Ecology and Management</i>, 531, 120851. <a href="https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120851">https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120851</a></li> </ul>
Fuego y aves	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hobson, K. A., Rempel, R. S., Greenwood, H., Turnbull, B., &amp; Wilgenburg, S. L. V. (2002). Acoustic surveys of birds using electronic recordings: New potential from an omnidirectional microphone system. <i>Wildlife Society Bulletin</i>, 30(3), 709–720.</li> <li>• Kułaga, K., &amp; Budka, M. (2019). Bird species detection by an observer and an autonomous sound recorder in two different environments: Forest and farmland. <i>PLOS ONE</i>, 14(2), e0211970. <a href="https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211970">https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211970</a></li> <li>• Lindenmayer, D. B., Blanchard, W., McBurney, L., Blair, D., Banks, S. C., Driscoll, D. A., Smith, A. L., &amp; Gill, A. M. (2014). Complex responses of birds to landscape-level fire extent, fire severity and environmental drivers. <i>Diversity and Distributions</i>, 20(4), 467-477. <a href="https://doi.org/10.1111/ddi.12172">https://doi.org/10.1111/ddi.12172</a></li> <li>• Regos, A., D’Amen, M., Herrando, S. et al. Fire management, climate change and their interacting effects on birds in complex Mediterranean landscapes: dynamic distribution modelling of an early-successional species—the near-threatened Dartford Warbler (<i>Sylvia undata</i>). <i>J Ornithol</i> 156 (Suppl 1), 275–286 (2015). <a href="https://doi.org/10.1007/s10336-015-1174-9">https://doi.org/10.1007/s10336-015-1174-9</a></li> <li>• Saracco, J. F., Siegel, R. B., &amp; Wilkerson, R. L. (2011). Occupancy modeling of Black-backed Woodpeckers on burned Sierra Nevada forests. <i>Ecosphere</i>, 2(3), art31. <a href="https://doi.org/10.1890/ES10-00132.1">https://doi.org/10.1890/ES10-00132.1</a></li> <li>🕒 Steel, Z. L., Fogg, A. M., Burnett, R. D., Roberts, L. J., &amp; Safford, H. D. (2021). When bigger isn’t better—Implications of large high-severity wildfire patches for avian diversity and community composition. <i>Diversity and Distributions</i>, 28(3), 439–453. <a href="https://doi.org/10.1111/ddi.13281">https://doi.org/10.1111/ddi.13281</a> <a href="#">Wiley Online Library+5Wiley Online Library+5Zack Steel+5</a></li> <li>🕒 Siegel, R. B., Wilkerson, R. L., Saracco, J. F., &amp; Steel, Z. L. (2011). Elevational distribution of common bird species on the</li> </ul>

Categoría	Referencia
	<p>Sierra Nevada's west slope. <i>Western Birds</i>, 42, 2–26. (Sin DOI disponible) <a href="https://zacksteel.github.io">zacksteel.github.io</a></p> <p>🕒 Steel, Z. L., Safford, H. D., &amp; Viers, J. H. (2015). The fire frequency–severity relationship and the legacy of fire suppression in California forests. <i>Ecosphere</i>, 6(art8). <a href="https://doi.org/10.1890/ES14-00302.1">https://doi.org/10.1890/ES14-00302.1</a></p>
<p><b>Percepción social y políticas</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Miller, J. D., Safford, H. D., Crimmins, M. A., &amp; Thode, A. E. (2012). Trends and causes of severity, size, and number of fires in northwestern California, USA. <i>Ecological Applications</i>, 22(1), 184–203. <a href="https://doi.org/10.1890/10-2108.1">https://doi.org/10.1890/10-2108.1</a></li> <li>• Moritz, M. A., et al. (2014). Learning to coexist with wildfire. <i>Nature</i>, 515(7525), 58–66. <a href="https://doi.org/10.1038/nature13946">https://doi.org/10.1038/nature13946</a></li> <li>• Smith, A. M. S., et al. (2016). The science of firescapes: Achieving fire-resilient communities. <i>BioScience</i>, 66(2), 130–146. <a href="https://doi.org/10.1093/biosci/biv182">https://doi.org/10.1093/biosci/biv182</a></li> <li>• Keane, R. E., et al. (2008). Ecological effects of large fires on US landscapes: Benefit or catastrophe? <i>International Journal of Wildland Fire</i>, 17(6), 696–712. <a href="https://doi.org/10.1071/WF07148">https://doi.org/10.1071/WF07148</a></li> </ul>

## Bibliografía

- Assandri, G., Bazzi, G., Siddi, L., Nardelli, R., Cecere, J. G., Rubolini, D., & Morganti, M. (2023). The occurrence of a flagship raptor species in intensive agroecosystems is associated with more diverse farmland bird communities: Opportunities for market-based conservation. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 349, 108441. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108441>
- Balmford, A. (2013). Pollution, politics, and vultures. *Science*, 339(6120), 653–654. <https://doi.org/10.1126/science.123>.
- Boer, M. M., & Bradstock, R. A. (2020). Unprecedented burn area of Australian mega forest fires. *Nature Climate Change*, 10(3), 171–172. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0716->

- Bowman, D. M. J. S., Balch, J. K., Artaxo, P., Bond, W. J., Cochrane, M. A., D'Antonio, C. M., ... & Pyne, S. J. (2009). Fire in the Earth system. *Science*, 324(5926), 481–484.
- Busby, S., Veblen, T. T., González, M. E., & Holz, A. (2024). Impacts of a short-interval severe fire on forest structure and regeneration in a temperate Andean Araucaria-Nothofagus forest. *Fire Ecology*, 20(1), 1-20. <https://doi.org/10.1186/s42408-024-00327-2>
- Castillo, S., M., Garfías, S., R., González, R., L. (2012). Análisis de grandes incendios forestales en la vegetación nativa de Chile. *Interciencia*, 37(11), 796-804.
- Cheng, Y., Luo, P., Yang, H., Li, H., Luo, C., Jia, H., & Huang, Y. (2023). Fire effects on soil carbon cycling pools in forest ecosystems: A global meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 895, 165001. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165001>
- Darras, Kevin & Furnas, Brett & Fitriawan, Irfan & Mulyani, Yeni & Tschardtke, Teja. (2018). Estimating bird detection distances in sound recordings for standardising detection ranges and distance sampling. *Methods in Ecology and Evolution*. 9. 10.1111/2041-210X.13031.
- DellaSala, D. A., & Hanson, C. T. (2015). *The ecological importance of mixed-severity fires: Nature's phoenix*. Island Press.
- Digby, A., Towsey, M., Bell, B. D., & Teal, P. D. (2013). A practical comparison of manual and autonomous methods for acoustic monitoring of birds. *Methods in Ecology and Evolution*, 4(7), 675–683. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12060>
- Fettig, C. J., Runyon, J. B., Homicz, C. S., James, P. M. A., & Ulyshen, M. D. (2022). Fire and insect interactions in North American forests. *Current Forestry Reports*, 8, 301-316. <https://doi.org/10.1007/s40725-022-00170-1>
- Flannigan, M., Stocks, B., Turetsky, M., & Wotton, M. (2009). Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest. *Global Change Biology*, 15(3), 549–560.
- Fraixedas, S., Lindén, A., Piha, M., Cabeza, M., Gregory, R., & Lehikoinen, A. (2020). A state-of-the-art review on birds as indicators of biodiversity: Advances, challenges, and future directions. *Ecological Indicators*, 118, 106728. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106728>
- González Hernández, A., Pérez Miranda, R., Moreno Sánchez, F., Ramírez Ojeda, G., Rosales Mata, S., Cano Pineda, A., Guerra de la Cruz, V., & Torres Esquivel, M. C. (2014).

- Variabilidad de la temperatura local en bosques de coníferas por efectos de la deforestación. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(31), 22-39.
- Güney, C.O., Mert, A. & Gülsoy, S. Assessing fire severity in Turkey's forest ecosystems using spectral indices from satellite images. *J. For. Res.* 34, 1747–1761 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11676-023-01620-7>.
- Hardtke, L.A., Blanco, P.D., del Valle, H.F., Metternicht, G.I & Sione, W.F. (2015) Semi-automated mapping of burned areas in semi-arid ecosystems using MODIS time-series imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 38, 25-35.
- Holsinger, L.M., Parks, S.A., Saperstein, L.B., Loehman, R.A., Whitman, E., Barnes, J. and Parisien, M.-A. (2022), Improved fire severity mapping in the North American boreal forest using a hybrid composite method. *Remote Sens EcolConserv*, 8: 222-235. <https://doi.org/10.1002/rse2.238>.
- Hutto, R. L. (2008). The ecological importance of severe wildfires: some like it hot. *Ecological Applications*, 18(8), 1827-1834.
- Inglett, P. W., Inglett, K. S., & Liao, X. (2013). Fire effects on nitrogen cycling in native and restored calcareous wetlands. *Fire Ecology*, 9(1), 6-20. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0901006>
- Kahl, S., Wood, C. M., Eibl, M., & Klinck, H. (2021). BirdNET: A Deep Learning Solution for Bird Identification Using Audio Recordings. *Ecological Informatics*, 61, 101236. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2020.101236>
- Kati, V., Devillers, P., Dufrêne, M., Legakis, A., Vokou, D., & Lebrun, P. (2004). Testing the value of six taxonomic groups as biodiversity indicators at a local scale. *Conservation Biology*, 18(3), 667–675. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2004.00465.x>
- Keeley, J. E. (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 18(1), 116-126.
- Keeley, J. E., Pausas, J. G., Rundel, P. W., Bond, W. J., & Bradstock, R. A. (2011). Fire as an evolutionary pressure shaping plant traits. *Trends in Plant Science*, 16(8), 406–411.
- Kéry, M., Gardner, B., & Monnerat, C. (2010). Predicting species distributions from checklist data using site-occupancy models. *Journal of Biogeography*, 37(10), 1851–1862. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02359.x>
- Kozlowski, T. T., & Ahlgren, C. E. (1974). *Fire and ecosystems*. Academic Press.

- Lentile, Leigh & Holden, Zachary & Smith, Alistair & Falkowski, Michael & Hudak, AT & Morgan, Penelope & Lewis, Sarah & Gessler, Paul & Benson, Nate. (2006). Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. *International Journal of Wildland Fire*. 15. 319-345. 10.1071/WF05097.
- Liao, X., Inglett, P. W., & Inglett, K. S. (2013). Fire effects on nitrogen cycling in native and restored calcareous wetlands. *FireEcology*, 9(1), 6-20. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0901006>
- Lindenmayer, D. B., & Likens, G. E. (2009). Adaptive monitoring: a new paradigm for long-term research and monitoring. *Trends in Ecology & Evolution*, 24(9), 482-486.
- MacKenzie, D. I., & Royle, J. A. (2005). *Designing occupancy studies: general advice and allocating survey effort*. *Journal of Applied Ecology*, 42(6), 1105–1114.
- Marañón-Jiménez, S., Fernández-Ondoño, E., & Castro, J. (2010). Madera quemada en incendios forestales como reservorio de nutrientes para el suelo en un gradiente altitudinal.
- Mekonen, S. (2017). Birds as biodiversity and environmental indicators. *Journal of Natural Sciences Research*, 7(21). Retrieved from [www.iiste.org](http://www.iiste.org)
- Montorio, R., Pérez-Cabello, F., Borini Alves, D., & García-Martín, A. (2020). Unitemporal approach to fire severity mapping using multispectral synthetic databases and Random Forests. *Remote Sensing of Environment*, 249, 112025. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112025>
- Moreira, F., Ascoli, D., Safford, H. D., Adams, M. A., Moreno, J. M., Pereira, J. M. C., ... & Xanthopoulos, G. (2020). Wildfire management in Mediterranean-type regions: paradigm change needed. *Environmental Research Letters*, 15(1), 011001.
- Morgan, Penelope & Keane, Robert & Dillon, Gregory & Jain, Terri & Hudak, AT & Karau, Eva & Sikkink, Pamela & Holden, Zachary & Strand, Eva. (2014). Challenges of assessing fire and burn severity using field measures, remote sensing and modelling. *International Journal of Wildland Fire*. 23. 1045-1060. 10.1071/WF13058.
- Morgan, Penelope; Keane, Robert E.; Dillon, Gregory K.; Jain, Theresa B.; Hudak, Andrew T.; Karau, Eva C.; Sikkink, Pamela G.; Holden, Zachery A.; Strand, Eva K. 2014. Challenges of assessing fire and burn severity using field measures, remote sensing and modelling. *International Journal of Wildland Fire*. 23: 1045-1060.
- Mueller-Dombois, D., & Ellenberg, H. (1974). *Aims and Methods of Vegetation Ecology*. Wiley.
- Nappi, A., & Drapeau, P. (2009). Recolonization by Black-backed Woodpeckers of burned forests: timing

- and management implications. *Journal of Wildlife Management*, 73(3), 456-463.
- Nioti, F., Dimopoulos, P. y Koutsias, N. (2011). Corrección del perímetro de la cicatriz del incendio forestal de 1983 utilizando datos satelitales Landsat archivados por el USGS. *GIScience & Remote Sensing*, 48 (4), 600–613. <https://doi.org/10.2747/1548-1603.48.4.600>.
- O'Connell, T. J., Jackson, L. E., & Brooks, R. P. (2000). Bird guilds as indicators of ecological condition in the central Appalachians. *Ecological Applications*, 10(6), 1706-1721.
- Parker, T. J., Clancy, K. M., & Mathiasen, R. L. (2006). Interactions among fire, insects and pathogens in coniferous forests of the interior western United States and Canada. *Agricultural and Forest Entomology*, 8(3), 167-189. <https://doi.org/10.1111/j.1461-9563.2006.00305.x>
- Parsons, A., Robichaud, P. R., Lewis, S. A., Napper, C., & Clark, J. T. (2022). Guía de campo para elaborar un mapa de la severidad del incendio en el suelo después de un incendio (Español). Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-243. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Parsons, Annette & Robichaud, Peter & Lewis, Sarah & Napper, Carolyn. (2010). Field Guide for Mapping Post-fire Soil Burn Severity. General Technical Report, RMRS-GTR-243.
- Pausas, J. G., & Keeley, J. E. (2014). Evolutionary ecology of resprouting and seeding in fire-prone ecosystems. *New Phytologist*, 204(1), 55–65.
- Peng Liu, Yongxue Liu, Xiaoxiao Guo, Wanjing Zhao, Huansha Wu, Wenxuan Xu. (2023). Burned area detection and mapping using time series Sentinel-2 multispectral images, *Remote Sensing of Environment*, ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113753>.
- Pyne, S. J. (2016). *Fire in America: A Cultural History of Wildland and Rural Fire*. University of Washington Press.
- Quinn, J. E., Brandle, J. R., Johnson, R. J., & Tyre, A. J. (2011). Application of detectability in the use of indicator species: A case study with birds. *Ecological Indicators*, 11(5), 1413-1418. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.03.003>
- Quintero-Gradilla, S. D., Jardel-Peláez, E. J., Cuevas-Guzmán, R., García-Oliva, F., & Martínez-Yrizar, A. (2019). Cambio postincendio en la estructura y composición del estrato arbóreo y carga de combustibles en un bosque de *Pinus douglasiana* de México. *Madera Y*

- Bosques, 25(3). <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2531888>
- Ralph, C. J., Droege, S., & Sauer, J. R. (1995). Managing and monitoring birds using point counts: standards and applications. USDA Forest Service General Technical Report PSW-GTR-149.
- Sherry, T. W., & Holmes, R. T. (1995). Summer versus winter limitation of populations: what are the issues and what is the evidence? In *Ecology and management of neotropical migratory birds* (pp. 85-120). Oxford University Press.
- Shonfield, Julia & Bayne, Erin. (2017). Autonomous recording units in avian ecological research: Current use and future applications. *Avian Conservation and Ecology*. 12. 14. [10.5751/ACE-00974-120114](https://doi.org/10.5751/ACE-00974-120114).
- Silva-Cardoza, A. I., Vega-Nieva, D. J., López-Serrano, P. M., Corral-Rivas, J. J., Briseño Reyes, J., Briones-Herrera, C. I., Loera Medina, J. C., Parra Aguirre, E., Rodríguez-Trejo, D. A., & Jardel-Peláez, E. (2021). Metodología para la evaluación de la severidad de incendios forestales en campo, en ecosistemas de bosque templado de México. Fondo Sectorial para la Investigación, el Desarrollo y la Innovación Tecnológica y Forestal CONAFOR-CONACYT, proyecto CONAFOR-CONACYT-2018-C02-B-S131553.
- Silva-Cardoza, A. I., Vega-Nieva, D., Briones Herrera, C., Briseño Reyes, J., López Serrano, P., & Corral-Rivas, J. J. (2021). Evaluación y mapeo de la severidad por incendios forestales en la Sierra Madre Occidental.
- Simler-Williamson, A. B., Metz, M. R., Frangioso, K. M., & Rizzo, D. M. (2021). Wildfire alters the disturbance impacts of an emerging forest disease via changes to host occurrence and demographic structure. *Journal of Ecology*, 109(2), 676-691. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13495>
- Stephens, S. L., Agee, J. K., Fulé, P. Z., North, M. P., Romme, W. H., Swetnam, T. W., & Turner, M. G. (2013). Managing forests and fire in changing climates. *Science*, 342(6154), 41–42.
- Sugai, Larissa & Silva, Thiago & Ribeiro Jr, José & Llusia, Diego. (2018). Terrestrial Passive Acoustic Monitoring: Review and Perspectives. *BioScience*. 69. [10.1093/biosci/biy147](https://doi.org/10.1093/biosci/biy147).
- UN-SPIDER. (s.f.). Paso a paso: Mapeo de severidad de incendios forestales en QGIS. United Nations Platform for Space-based Information for Disaster Management and Emergency Response (UN-SPIDER). Recuperado el 8 de abril 2025 de <https://un-spider.org/es/asesoria/practicas-recomendadas/practica-recomendada-mapeo-gravedad-quemaduras/paso-a-paso/qgis>

- Vaccaro, A. S., & Bellocq, M. I. (2019). Diversidad taxonómica y funcional de aves: Diferencias entre hábitats antrópicos en un bosque subtropical. *Ecología Austral*, 29(3), 391–404. <https://doi.org/10.25260/EA.19.29.3.0.873>
- Westerling, A. L., Hidalgo, H. G., Cayan, D. R., & Swetnam, T. W. (2006). Warming and earlier spring increase western U.S. forest wildfire activity. *Science*, 313(5789), 940–943.
- White, L. A., & Gibson, R. K. (2022). Comparing Fire Extent and Severity Mapping between Sentinel 2 and Landsat 8 Satellite Sensors. *Remote Sensing*, 14(7), 1661. <https://doi.org/10.3390/rs14071661>.
- Yoccoz, N. G., Nichols, J. D., & Boulinier, T. (2001). Monitoring of biological diversity in space and time. *Trends in Ecology & Evolution*, 16(8), 446-453.

## CONCLUSIÓN GENERAL

### *a) Conclusiones ecológicas*

- El fuego es un proceso ecológico esencial en los bosques templados de coníferas del Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir, ya que contribuye a su estructura, diversidad y resiliencia ecológica.
- Se observó que los incendios de alta y muy alta severidad pueden favorecer la riqueza de aves, especialmente durante la primavera, lo cual refuerza la visión del fuego como un componente funcional del ecosistema, más que como una perturbación exclusivamente negativa.
- La riqueza de especies varía significativamente según la interacción entre la severidad del incendio y la estacionalidad, con repuntes particulares en áreas de severidad media-baja en ciertas épocas del año.

### *b) Conclusiones metodológicas*

- El monitoreo acústico pasivo se consolidó como una herramienta eficaz, práctica y no invasiva para detectar patrones de riqueza de aves en contextos post-incendio, incluso con recursos limitados.
- La elaboración de un protocolo técnico replicable permite su aplicación en otras áreas naturales protegidas, facilitando el seguimiento sistemático y la comparación entre sitios y momentos temporales.
- El uso de modelo lineal generalizado con distribución binomial negativa fue adecuado para modelar riqueza de especies, resolviendo problemas de sobredispersión comunes en este tipo de datos ecológicos.

### *c) Conclusiones para manejo y conservación*

- Las áreas con alta severidad no deben considerarse zonas degradadas por defecto; por el contrario, pueden albergar una alta diversidad aviar y representar núcleos importantes para la resiliencia del ecosistema.
- Las aves funcionan como bioindicadores valiosos de los procesos de recuperación ecológica post-incendio, permitiendo evaluar la trayectoria del ecosistema y priorizar zonas de intervención.
- Este trabajo ofrece un aporte concreto al fortalecimiento de estrategias de conservación

basadas en evidencia, con implicaciones directas para el diseño de planes de manejo del fuego más adaptativos y sostenibles.

## RECOMENDACIONES FINALES

1. *Incluir el monitoreo acústico en los Programas de Manejo del Fuego de ANP.*

Integrar protocolos de monitoreo acústico pasivo como parte del seguimiento ecológico post-incendio en Áreas Naturales Protegidas con bosques templados. Esta herramienta no invasiva permite generar datos comparables, sistemáticos y útiles para la planeación adaptativa.

2. *Dar prioridad a la conservación de áreas con alta severidad post-incendio.*

Reconocer que zonas afectadas por incendios de alta severidad, especialmente durante la primavera, pueden albergar una alta riqueza de aves. Estas áreas deben considerarse prioritarias para conservación, monitoreo y estudio, más que clasificarse automáticamente como degradadas.

3. *Incorporar estacionalidad y severidad en el diseño de estudios post-fuego.*

Diseñar muestreos que contemplen explícitamente diferentes grados de severidad y su interacción con la estacionalidad. Esta combinación permite identificar patrones dinámicos de resiliencia y recuperación que serían invisibles en estudios puntuales o estacionales limitadas.

4. *Capacitar al personal técnico en bioacústica accesible.*

Fomentar la capacitación continua del personal de campo en el uso de tecnologías de análisis acústicos accesibles como *Raven Pro* y *BirdNet*. Estas herramientas permiten ampliar las capacidades de monitoreo sin requerir observadores expertos permanentemente en campo.

5. *Replicar el protocolo en otras sierras de Baja California.*

Aplicar esta metodología en regiones como la Sierra de Juárez y otros ecosistemas templado-mediterráneos para generar líneas bases comparativas regionales. Esto permitirá evaluar patrones más amplios de respuesta ecológica al fuego en el noroeste de México.

6. *Fortalecer el monitoreo sistemático y de largo plazo.*

Promover programas de monitoreo a corto, mediano y largo plazo en zonas afectadas por

incendios, lo cual es fundamental para comprender los procesos de regeneración del ecosistema, validar intervenciones de manejo y detectar cambios asociados al cambio climático o al uso del suelo.

7. *Explorar dimensiones funcionales de la avifauna.*

Impulsar investigaciones futuras orientadas a evaluar dimensiones funcionales de las aves, como gremios alimenticios, tipos de nidificación o dependencia de microhábitats. Esto enriquecerá las estrategias de restauración ecológica con base en funciones clave del ecosistema.

8. *Adoptar protocolos estandarizados y transparentes.*

Utilizar métodos rigurosos y estandarizados en todas las etapas del estudio: desde la selección de sitios hasta el análisis de datos acústicos. Esto garantizará resultados confiables, comparables entre regiones y replicables en futuras evaluaciones post-incendio.

Estas recomendaciones buscan traducir el conocimiento generado en esta tesis en acciones concretas de conservación, monitoreo y manejo adaptativo del fuego. Su aplicación contribuirá no solo a una mejor comprensión ecológica de los efectos del incendio, sino también a la construcción de estrategias sostenibles y basadas en evidencia para la gestión de los bosques templados de Baja California.