

TECNOLOGÍAS APLICADAS EN EL ESTUDIO Y CONSERVACIÓN DE LA FAUNA SILVESTRE: BREVE REVISIÓN Y OPORTUNIDADES DE DESARROLLO

Salvador Mandujano¹, Rodolfo Vera^{2,*}, Alberto Risquez-Valdepeña³, Guadalupe Méndez-Cárdenas⁴, Arturo Zavaleta⁵, Concepción López-Téllez⁶

^{1,5}Red de Biología y Conservación de Vertebrados, ³Coordinación de Tecnologías de Información (Instituto de Ecología A.C.)

²Academia de Telemática (Instituto Politécnico Nacional)

⁴Departamento de Ciencias de la Salud (UAM, Unidad Lerma)

⁶Facultad de Ciencias Biológicas (BUAP)

*Autor de correspondencia: rvera@ipn.mx

salvador.mandujano@inecol.mx, alberto.risquez@inecol.mx, m.mendez@correo.ler.uam.mx, biol.arturo.zavaleta@gmail.com, concepcionlopeztelez@gmail.com

Boletín No. 106, 1o. de mayo de 2025

Resumen

El estudio y monitoreo de la fauna silvestre es importante desde una perspectiva tanto teórica como aplicada. Los monitoreos sirven para evaluar el estado de conservación e implementar planes para mitigar y recuperar a las especies de fauna y su hábitat. Esto es particularmente importante para especies amenazadas o en peligro de extinción debido a múltiples actividades humanas. Desde inicios del siglo pasado se aplican diferentes tecnologías para estudiar y monitorear a los animales, sobre todo en las frecuentes situaciones donde no es sencillo obtener información de manera visual. En este artículo describimos brevemente cómo se han empleado algunos de los principales métodos que se basan en dispositivos electrónicos e informáticos para la obtención de datos de los animales en vida libre. La combinación de estas tecnologías no solo incrementa la eficiencia y precisión de los esfuerzos de conservación, sino que también abre un campo amplio para la innovación en México. En particular, el desarrollo de prototipos personalizados y la implementación de sistemas integrados permiten abordar problemas complejos enfocados al monitoreo de la fauna y su hábitat. Concluimos que la colaboración interdisciplinaria entre biólogos, ingenieros e informáticos será clave para aprovechar estas oportunidades y garantizar un futuro sostenible para la flora y fauna silvestres.

Palabras Clave: Fauna silvestre, Monitoreo, Conservación, Cámaras, Drones, Grabaciones, Telemetría, Biología, Ingeniería, Informática.

1. Introducción

La fauna silvestre se refiere a las especies de animales no domésticos y es un componente esencial de la biodiversidad, por lo que su pérdida puede afectar el funcionamiento de los ecosistemas. Por tal motivo, el estudio y monitoreo de la fauna es importante desde una perspectiva tanto teórica como aplicada. Los monitoreos sirven para evaluar el estado de conservación e implementar planes para mitigar y recuperar a las especies de fauna y su hábitat. Esto es particularmente relevante para aquellas especies que se encuentran amenazadas o en riesgo de extinción como consecuencia de las actividades humanas. En este sentido, en el monitoreo de la fauna silvestre se emplean diversas tecnologías las cuales permiten obtener datos sobre las especies.

Similar a cualquier tipo de proyecto de desarrollo científico y tecnológico, el monitoreo de la fauna silvestre inicia con tener objetivos claramente establecidos en los cuales se describe claramente el propósito por el cual se requiere obtener determinado tipo de información de la fauna a nivel de individuos, poblaciones y

especies.

Estos objetivos pueden obedecer a múltiples intereses que van desde el estudio para incrementar el conocimiento científico lo cual por sí mismo justifica un gran número de proyectos, hasta objetivos que tienen que ver con la aplicación de soluciones a problemas que frecuentemente enfrenta la fauna como por ejemplo la pérdida de su hábitat debido a la deforestación y fragmentación, la contaminación, la cacería y tráfico ilegal, la introducción de otras especies de animales tanto domésticas como aquellas de origen exótico, los parásitos y patógenos que usualmente son introducidos por estas especies no silvestres, el cambio de uso del suelo al convertir la vegetación original a zonas agrícolas, pastorales, asentamientos humanos y muchas otras. Por lo tanto, se requiere información de campo la cual una vez organizada, procesada y analizada puede ser empleada para mitigar los posibles efectos negativos y tratar de revertirlos a partir de prácticas de manejo.

Esto significa que en gran medida lo que se pretende en el trabajo biológico, y de muchas otras disciplinas, es la conservación de las especies de fauna silvestre en su estado natural, es decir, preservando y/o recuperando su hábitat original, para tratar de preservar sus interacciones con otras especies y su ambiente. Además, considerando de manera simultánea los intereses propios de las comunidades humanas, principalmente rurales de origen mestizo y también de las diferentes etnias que habitan en el país.

En consecuencia, desde el siglo pasado hasta el presente, se han aplicado numerosas técnicas para tratar de obtener información de los animales que viven en estado natural o dentro de los ecosistemas. Estas técnicas son muy variadas y han sido diseñadas con la finalidad de maximizar la obtención de datos de animales usualmente difíciles de observar directamente en las regiones donde habitan. Estas técnicas incluyen desde tecnología “no electrónica” como por ejemplo el empleo de binoculares, el uso de redes para la captura de aves y murciélagos, trampas de madera y metálicas para capturar vivos a los animales, el empleo de dardos para anestesiarse a los animales disparando con cerbatanas, pistolas o rifles especialmente diseñados para no dañar a los animales.

También desde hace décadas se han desarrollado técnicas que emplean tecnología electrónica y de otro tipo para obtener datos de los animales. Algunas de las técnicas más empleadas son las cámaras trampa para monitorear especies de difícil detección u observación en campo, y capturar eventualmente cientos o miles de imágenes de las especies. Otro método es el monitoreo mediante grabadoras digitales el cual permite captar sonidos de las especies a distancias que evitan perturbar a los animales. Una tecnología muy empleada es la basada en la radiotelemetría que consiste en la captura de los animales y colocarles collares con radios los cuales emiten frecuencias particulares cuya señal puede ser capturada por medio de antenas locales (en el caso de sistemas tipo VHF) o satelital en el caso de sistemas de posicionamiento global (GPS). Otra tecnología es la basada en la implantación de microchips lo que permite obtener datos de sus movimientos y comportamientos. Por otro lado, los drones o vehículos aéreos no tripulados equipados con cámaras de alta resolución y térmicas son muy útiles para capturar imágenes y videos.

Para organizar, almacenar, procesar y analizar la información obtenida en los monitoreos, se emplean diversas técnicas y programas computacionales algunos de ellos desarrollados para tareas específicas y disponibles de manera gratuita y/o de pago. Sin embargo, otro de los avances es el empleo de la Inteligencia Artificial (IA) la cual se está utilizando cada vez más para analizar grandes volúmenes de datos recopilados con las diferentes tecnologías.

Por lo tanto, la finalidad o propósito de este artículo es brindar un panorama muy general del empleo de la tecnología para el estudio y conservación de la fauna. Considerando la audiencia a la que se pretende dirigir este artículo la cual no está orientada totalmente al área biológica, lo que pretendemos es mostrar brevemente cómo se han empleado algunos de los principales métodos que se basan en dispositivos electrónicos e informáticos para la obtención de datos de los animales en vida libre. Asimismo, nuestro segundo objetivo es comentar sobre las grandes necesidades y oportunidades que existen para plantear proyectos de colaboración entre los estudiantes, ingenieros, profesores y otros especialistas en las áreas biológicas, de ingeniería e informática, para contribuir en proyectos de conservación de la fauna y de los ecosistemas donde habitan. Al final de este artículo se proveen de algunas referencias bibliográficas que podrían ser interesantes para el lector.

2. Monitoreo basados en tecnologías electrónicas e informática

2.1 Cámaras trampa

La historia del fototrampeo se remonta a los años 1890 a los inventos de George Shiras, en los cuales colocaba una cámara en la proa de su canoa, donde fotografiaba animales durante recorridos nocturnos cerca de la orilla del lago Whitefish, en Michigan. Fue Shiras quien ideó las primeras cámaras-trampa conocidas como cámaras de alambre, que estaban conectadas a una linterna mediante un cable y se activaban cuando el animal cruzaba y tiraba del cable. Este método también fue utilizado en África e India, donde el fotógrafo Champion obtuvo en 1927 la primera fotografía de un tigre salvaje. En esa misma década, Frank Chapman utilizó cámaras trampa en Barro Colorado, en Panamá, para realizar el primer inventario de fauna con este método capturando imágenes de especies de mamíferos incluidos, tapires, ocelotes y pumas.

Con el tiempo, los cables para disparar el obturador fueron sustituidos por nuevas tecnologías más avanzadas. Las cámaras analógicas comenzaron a emplearse con rollos fotográficos de 36 imágenes, un controlador de sensor detector de movimiento y calor, pero eran de gran tamaño. Con la llegada de la era digital, el tamaño y el peso se redujo, se empezaron a emplear tarjetas digitales que permitieron una mayor capacidad de almacenamiento y un sistema de flash con luz infrarroja. Estos avances tecnológicos han seguido avanzando y en la actualidad se pueden encontrar un gran número de modelos digitales, los cuales son de menor tamaño, tienen mayor capacidad de almacenamiento, capturan imágenes de alta calidad, cuentan con visión nocturna y detección térmica.



Figura 1 Monitoreo de fauna silvestre aplicando diferentes tecnologías para obtener información de campo. Imagen creada con inteligencia artificial. Aunque se representa México, no todas las imágenes de animales están presentes en nuestro país.

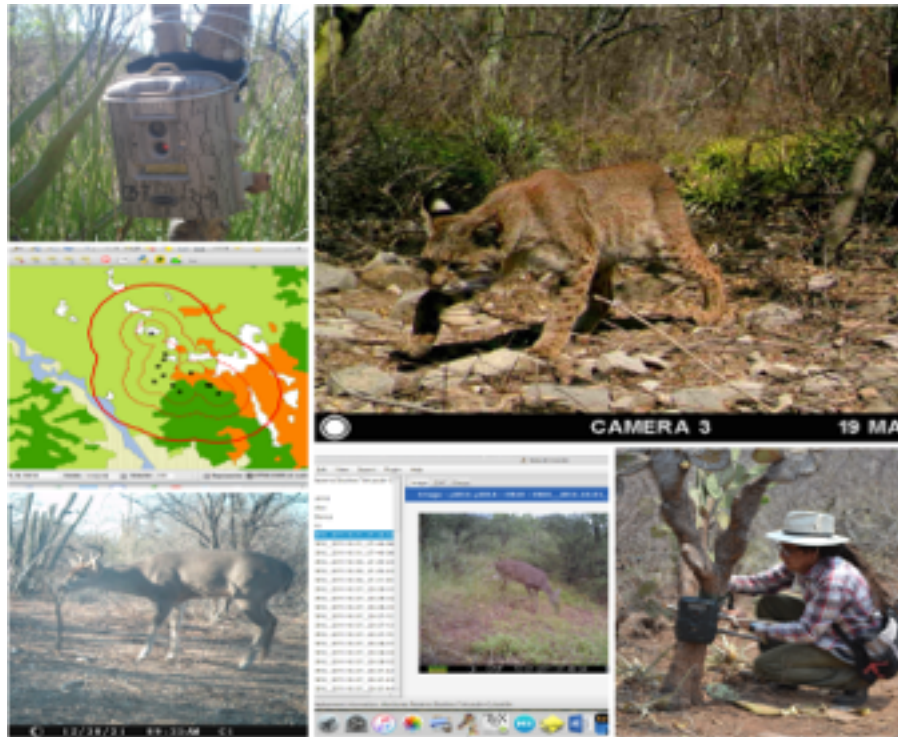


Figura 2 Monitoreo de fauna silvestre empleando las llamadas cámaras trampa que capturan fotos o videos de los animales cuando pasan frente al sensor óptico.

Las cámaras trampa son equipos fotográficos que se activan de manera automática y toman la fotografía cuando una especie pasa frente al detector de movimiento y calor. Desde el año 2000, el progreso del fototrampeo ha permitido que se registre un aumento constante en el uso de esta técnica en estudios de investigación. Este método ha permitido recopilar una gran cantidad de datos de fauna silvestre sin la necesidad de capturar a los animales (Fig. 2). Tradicionalmente, las cámaras trampa se han utilizado para estudiar especies de mamíferos terrestres de talla mediana y grande. No obstante, nuevas técnicas han permitido utilizar esta tecnología en el estudio de mamíferos pequeños y especies arbóreas. Así como para el estudio de otros grupos como las aves y los reptiles.

La integración de modelos estadísticos con la información proporcionada por las imágenes de las cámaras trampa se ha utilizado para documentar hábitos diurnos o nocturnos de diferentes especies, así como para modelar la ocupación, estimar el tamaño poblacional de varias especies al identificar individualmente a los organismos fotografiados por las marcas distintivas de sus cuerpos, por ejemplo, el monitoreo de tigres en la India. También, se ha aplicado con éxito para calcular la abundancia y densidad de otras especies como los jaguares. Además, ha servido para dar seguimiento a especies raras, amenazadas o en peligro de extinción.

A pesar del avance tecnológico de las cámaras trampa, aún se enfrentan ciertas limitaciones entre las que se encuentran los fallos en el equipo debido a problemas con los sensores de movimiento o cámaras que no se activan adecuadamente. También puede presentarse un mal funcionamiento causado por condiciones climáticas adversas como la lluvia, el calor o la humedad, así como daños causados por animales que impiden el adecuado funcionamiento del equipo. Además, el rango de detección de las cámaras, así como una mala elección del sitio donde se instala el dispositivo puede afectar el registro de ciertas especies.

Las cámaras modernas pueden almacenar una gran cantidad de imágenes, por lo que se requiere analizar grandes volúmenes de datos. Actualmente, gracias al desarrollo de modelos de reconocimiento de imágenes que se basan en la inteligencia artificial (IA), es posible detectar animales e identificar especies en las fotos de las cámaras trampa. Esto reduce en gran medida el número de fotos que necesitan identificación manual y mejora la eficiencia del procesamiento de datos. Estos modelos que utilizan IA se encuentran en

desarrollo y se enfocan en la fauna de ciertas regiones del mundo. Algunos de los modelos disponibles en línea son: Wildlife Insights (WI), TrapTagger, WildTrax, EcoAssist, Camelot, Trapper, DeepFaune, Animi, WildID, Dudek AI Image Toolkit, RECONN.AI, MegaDetector. Para obtener más información sobre estos y otros modelos que se encuentran disponibles y en desarrollo, así como para profundizar en el uso del IA en cámaras trampa, se puede consultar el siguiente enlace: Survey of Machine Learning Applications for Camera Trap Image Processing (<https://agentmorris.github.io/camera-trap-ml-survey/>).

En consecuencia, la técnica del fototrampeo ha permitido generar una gran cantidad de datos sobre diferentes especies en todo el mundo, por lo que se considera una herramienta fundamental para el estudio y conservación de la fauna silvestre y sus hábitats. Por lo cual, para maximizar el potencial de esta herramienta, es necesario implementar soluciones de almacenamiento de fotos y videos. Así como, crear bases de datos estructuradas que contengan la información clave como los metadatos, etiquetas de especies, la ubicación y la hora de captura. Además, la integración de esta información en páginas web permitirá visualizar y gestionar los datos de manera eficaz, facilitando la generación de análisis, gráficos y mapas. Esta información será de utilidad en la toma de decisiones para un mejor manejo y conservación de las especies.

2.2 Grabación de audios

Las características acústicas han sido utilizadas para diagnosticar especies y para distinguir entre especies crípticas. Las especies crípticas son difíciles de distinguir por su tamaño, la coloración de su pelaje y otras características corporales externas. En particular, las vocalizaciones de larga distancia presentan una estructura acústica muy estereotipada y, sin embargo, más del 60 % de las especies neotropicales no tienen información acústica de ningún tipo y solo se tienen repertorios vocales del 17 % de las especies. En consecuencia, no es fácil distinguir qué parte de la llamada contiene información especie-específicos. Por tal motivo es necesario estudiar la estructura física del llamado a partir de espectrogramas obtenidos con el método Fast Fourier Transformation FFT. La primera pregunta que surge cuando los investigadores quieren utilizar caracteres vocales para la identificación de especies es ¿cuáles de esos caracteres son relevantes e informativos para el diagnóstico de especies? Y, alternativamente, ¿cuáles de ellos pueden estar influenciados por factores sociales y/o ambientales que den lugar a patrones de evolución convergente?

Las señales acústicas vocales, en el nivel más básico, pueden codificar información sobre la identidad de un emisor y otras variables sociales, como sexo, excitación emocional, el contexto de la llamada, entre otras. Además, en los primates, las llamadas pueden tener importantes funciones sociales, como reunir a los compañeros, aumentar la cooperación, mantener alejados a los rivales y reducir los conflictos. Las llamadas también contienen información sobre la especie, la población, el individuo, estatus y referentes externos. Pero no es fácil distinguir qué parte de la llamada contiene estos mensajes específicos. La variación vocal puede explicarse por factores como la acústica ambiental, las propiedades físicas de la transmisión del sonido y la variación morfológica del órgano fonador. Dicha variación, debe evaluarse mediante métodos estadísticos clasificatorios. Los rasgos genéticos juegan un papel predominante para determinar la estructura acústica de los llamados y las variables acústicas como frecuencia (F0) fundamental y frecuencia dominante (FD) están determinadas principalmente por el tamaño corporal del emisor.

Con las vocalizaciones, también se han podido distinguir grupos de primates con características intermedias en poblaciones simpátricas donde se sobrelapan especies (Fig. 3).

El desarrollo de sistemas de aprendizaje automático y aprendizaje profundo (DL), así como el desarrollo de algoritmos supervisados simples y modelos auto-supervisados (SSM) aplicado a la bioacústica, son necesarios para procesar y analizar grandes bases de datos acústicos obtenidos del monitoreo acústico pasivo (PAM), y serán fundamentales para los esfuerzos de conservación que requieren registrar los patrones de movimiento, la demografía poblacional y la dinámica social con objetivos tales como tener un control de enfermedades y prevenir la caza furtiva. La disponibilidad de bases de datos masivas ofrece oportunidades para probar las predicciones del modelo socio-ecológico como la relación entre la complejidad social y acústica. El paisaje sonoro permitirá entender cómo la distribución de amenazas afecta a la distribución de primates. Las principales etapas para el desarrollo de estos modelos son: 1) Colección de datos en campo: sonograma en bruto. 2) Pre-procesamiento: segmentación, extracción de características como coeficientes cepstrales de frecuencia mel (MFCC), y el espectrograma. 3) Anotación de datos: marcas binarias (presencia

o ausencia de señal), marcas múltiples (llamado tipo, individuo, especie). 4) Selección del algoritmo/modelo: Input: espectrograma y sonograma, Output Modelo: estadísticos, redes neuronales, modelos transformados. 5) Entrenamiento y puesta a prueba del modelo: Entrenamiento del modelo sobre anotación de datos, Predicción de etiquetas de datos no anotados. 6) Evaluación de las predicciones del modelo: Falsos y verdaderos positivos. Etiquetamiento predicho (esperado) etiquetamiento real (observado).

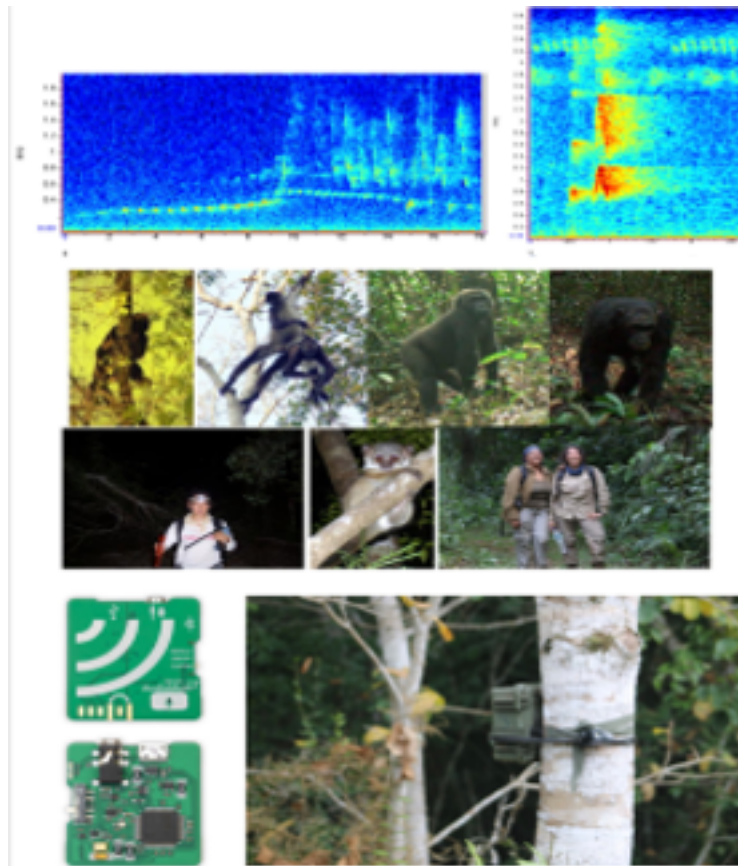


Figura 3 Monitoreo de fauna silvestre empleando equipo de grabación de las vocalizaciones en este ejemplo diferentes especies de primates en México y África.

Para el primer paso el equipo que se utiliza son grabadoras digitales con micrófonos direccionales de tipo supercardioide para seguimiento activos, y unidades de registro autónomo como las Swift one de Cornell, o los AudioMoth y en el caso de las primeras trabajan con baterías tipo D y tarjetas de memoria que para una tasa de muestreo de 8Khz (8000 muestras/sec) se utilizan 61 GB, pudiendo grabar 44 días seguidos. La unidad permite la grabación continua de datos durante 3 o más semanas a una frecuencia de muestreo de 48 kHz. Actualmente, la frecuencia de muestreo máxima admitida es de 96 kHz (resolución de 16 bits). Los datos se almacenan en una única tarjeta de memoria de tamaño completo (tarjetas SD de hasta 512 GB). Los horarios de grabación diaria se pueden programar mediante una herramienta de configuración y para que las tarjetas sean reconocidas por el dispositivo.

AudioMoth es un registrador acústico de espectro completo y bajo coste, y bajo consumo de energía. Puede registrar frecuencias audibles y ultrasónicas. Graba audio sin comprimir en una tarjeta microSD a velocidades de entre 8.000 y 384.000 muestras por segundo.

De las 522 especies de primates, reportadas por la UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza) el 65 % están clasificadas como vulnerables, en peligro y en peligro crítico de extinción. Las principales amenazas globales son el uso de recursos biológicos: la caza, la explotación forestal y la agricultura, la emergencia y transmisión de enfermedades infecciosas y el cambio climático. Los primates con mayor riesgo de desaparecer se encuentran en Madagascar y Asia; los gorilas y chimpancés que habitan en

África central están en riesgo crítico. El futuro de los primates está entrelazado a nuestro propio futuro, y a cómo enfrentemos las amenazas y modifiquemos nuestros modelos de consumo y producción. Nuestros hallazgos revelan que las llamadas fuertes separan específicamente poblaciones geográficamente aisladas. También encontramos que la variación genética coincide con la variación de los rasgos vocales, con base en ello, se pueden desarrollar herramientas bioacústicas computacionales para el diagnóstico y seguimiento de especies crípticas en la naturaleza. Los criterios más importantes para determinar las zonas protegidas son el número de especies conocidas, su estado de conservación y su distribución.

En otras palabras, sólo se puede proteger lo que se conoce.

2.3 Drones

En el estricto sentido, un dron se debe entender como cualquier vehículo capaz de dirigirse en forma autónoma a ejecutar una misión previamente programada, es decir, el vehículo ya sea aéreo, terrestre o acuático deberá estar gobernado por un sistema robotizado, mediante la combinación de tecnologías como la electrónica, la mecánica y la informática, con sistemas de navegación, cámaras, transmisores y sensores: giroscopios, acelerómetros, altímetros y GPS (Sistema de Posicionamiento Global), estos elementos permiten controlar la navegación y recopilar datos (telemetría).

Esto significa que un multicoptero, un avión, un auto, un submarino, una lancha o cualquier otro, del tamaño que sea, pueden o no ser drones, dependerá si cumplen con las características antes mencionadas, si no es autónomo no es un dron, es un vehículo guiado en forma remota. Una vez establecido este concepto, existen los UAV (Unmanned Aerial Vehicle) o VANT (Vehículo Aéreo No Tripulado); UGV (Unmanned Ground Vehicle) o VTNT (Vehículo Terrestre No Tripulado); USV (Unmanned Surface Vehicle) o VSNT (Vehículo de Superficie No Tripulado); UUV (Unmanned Underwater Vehicles). Con el uso de los drones aéreos, por ejemplo, se puede registrar la pérdida de hábitat y la fragmentación, ya que se han convertido en una de las más importantes amenazas para la biodiversidad en todos los ecosistemas terrestres, el registro visual desde el aire da un panorama general de la situación en que se encuentran dichas zonas para un sin fin de propósitos. De esta manera se puede facilitar el hacer comparativas de estado y tiempo.



Figura 4 Monitoreo de fauna silvestre empleando drones de tipo aviones y helicópteros dirigidos desde tierra o programados para vuelo libre.

En el caso del Instituto de Ecología, A.C., hemos trabajado en el proyecto de monitoreo de fauna y hábitats. En este proyecto se han utilizado drones en la modalidad de avión (UAV) con el propósito de experimentar sus ventajas y desventajas. Para determinar qué modalidad de aeronave es más conveniente utilizar, pri-

mero se deben conocer y considerar los hábitos y el comportamiento de las especies, así como la orografía y vegetación del lugar donde se encuentran; posteriormente se deben realizar pruebas de desempeño de los drones para evaluar la conveniencia de la modalidad seleccionada y de cada uno de los dispositivos con los que se debe hacer el equipamiento. Normalmente el trabajo de preparación de los drones se debe planear y realizar antes de la salida a campo, para dejar sólo ajustes que surjan dependiendo de las condiciones del momento.

Cada vez los equipos tienen mayores prestaciones y novedades tecnológicas, mismas que nos dan mayor seguridad, alcance, calidad y facilidades de uso, así como mayor posibilidad de aprovechamiento de los datos que se pueden obtener. Al haber iniciado con estas inquietudes desde hace varios años atrás, hemos tenido la experiencia de armar los UAVs, seleccionar dispositivos y destinar muchas horas de programación y pruebas. Conocer los aspectos legales, casos en los que se requiere licenciamiento o no, dependiendo del peso del dron, zona de vuelo, alcance, propósito, principalmente.

2.4 Telemetría

La radiotelemetría para el manejo de las especies silvestres y domésticas se define como la transmisión de información de un transmisor el cual es colocado a uno o varios individuos a un receptor. Se encuentran varios tipos de radio telemetría como la de alta frecuencia conocida como VHF, donde los animales son equipados con transmisores que emiten frecuencias de radio que pueden ser recibidos por receptores, en este método se utilizan antenas para realizar el seguimiento a larga distancia, ya que se requiere que los receptores estén lo suficientemente cerca de los animales para triangular las posiciones de los animales. Por otro lado, la radiotelemetría por sistema de posicionamiento global (GPS), se basa en la recepción en el transmisor que es colocado en el animal. Este transmisor cuenta con una computadora interna que, a través de la triangulación de datos son enviados simultáneamente por los satélites, calcula la posición geográfica del animal la cual es almacenada en el equipo colocado en el animal. La información obtenida se exporta a cualquier Sistema de Información Geográfica (SIG) esto permite identificar aquellas características del hábitat.



Figura 5 Monitoreo de fauna silvestre empleando collares tipo VHF o GPS para seguir los movimientos de los animales por medio de antenas manuales o vía satelital.

En consecuencia, esta técnica se ha utilizado ampliamente en diferentes estudios para determinar las áreas de actividad, uso de hábitat, patrones de movimiento, interacciones con otros individuos, migración y también el movimiento de forrajeo de animales domésticos. La aparición de este método y el avance de la tecnología han permitido conocer aspectos de la biología sobre la fauna que antes eran desconocidos o bien difícil de observar. Además, nos permite realizar cálculos y análisis más exactos de ámbito hogareño

o área de actividad, esta es una de las técnicas más utilizadas para los estudios de vertebrados.

2.5 Monitoreo ambiental

Los impactos ambientales derivados de las actividades humanas han generado diversos problemas que afectan directamente los procesos ecológicos, así como la relación entre las especies y su hábitat. Por ello, el monitoreo ambiental es esencial para la toma de decisiones relacionadas con el manejo y la gestión de recursos naturales como el aire, el agua, el suelo y la biodiversidad. Un monitoreo ambiental integral y eficiente permite generar información a través de instrumentos y técnicas especializadas, que faciliten la recopilación de datos biológicos, físicos, geospaciales y sociales, necesarios para analizar el estado de conservación de los recursos naturales.

En cuanto a los datos físicos para monitorear la calidad del agua, suelo y aire, se miden parámetros como el pH (mediante electrodos), la salinidad (con un refractómetro o conductímetro), la concentración de minerales (mediante espectrofotómetros o kits colorimétricos), y los nutrientes (con espectrómetros de absorción atómica (AAS) o de emisión óptica (ICP-OES). También se mide el ruido ambiental con un sonómetro, y el oxígeno disuelto a través de oxímetros electroquímicos u ópticos, entre otros.

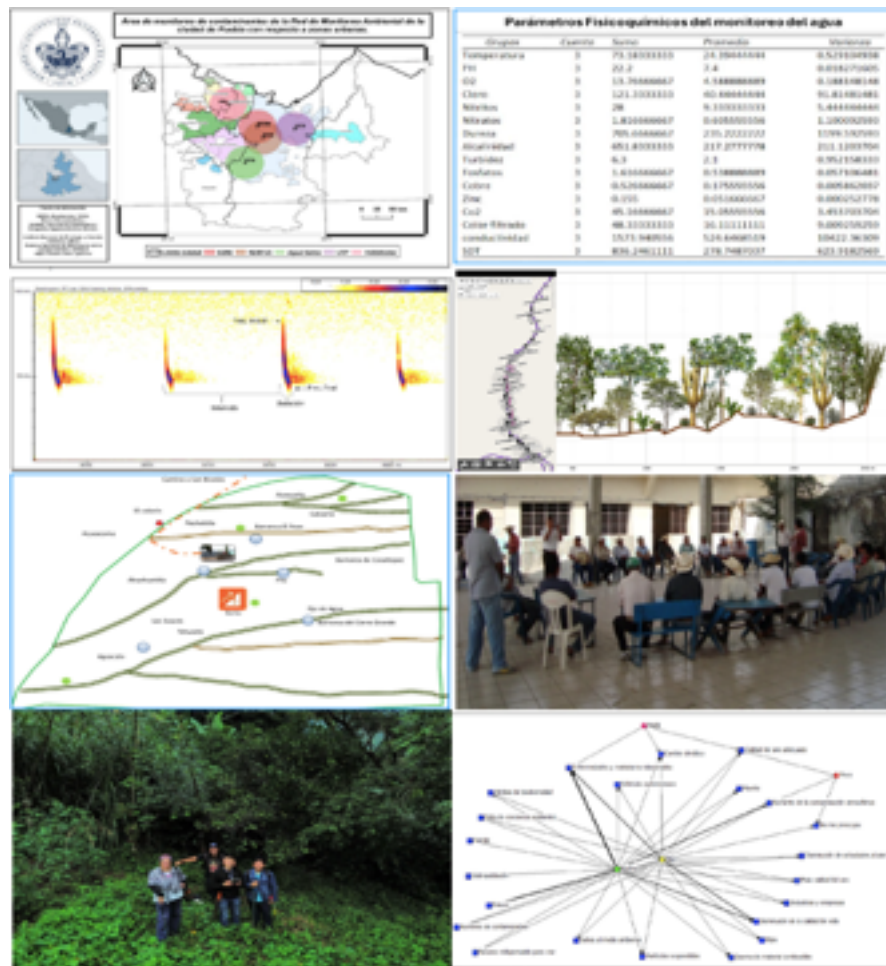


Figura 6 Ejemplos de monitoreo ambiental de recursos naturales de variables físicas, biológicas, geospaciales y sociales en comunidades del estado de Puebla.

Para la información biológica se emplean software especializados en la identificación de especies mediante sonidos acústicos de aves y ultrasónicos de murciélagos. Además, se utilizan tecnologías para obtener datos geospaciales, como la ubicación geográfica de especies o puntos de caracterización del hábitat, complementados por metadatos de entidades como Conabio, Inegi, el Registro Agrario Nacional y Conanp.

Con estos datos, se elaboran mapas mediante sistemas de información geográfica (SIG). Para la ubicación geográfica y la elaboración de perfiles topográficos se emplean herramientas como AlpineQuest, y para el análisis de imágenes y datos morfométricos se utiliza el software ImageJ. Para el análisis de sonidos ultrasónicos de murciélagos, se usa BatSound, y para identificar especies a través de los cantos de aves, se emplean BirdNet y Audacity. Para la medición de contaminantes in situ en el aire, se utiliza el software Outdoor Air Quality Test (Pro), entre otros.

En cuanto a los datos sociales generados a partir de talleres y recorridos de campo, se recogen mediante instrumentos como encuestas, entrevistas, líneas del tiempo y mapas sociales y ambientales sobre el uso del territorio y zonas de reserva. Para analizar esta información, se utilizan software como Gephi y Ucinet, que permiten crear redes de representación social.

El manejo de estas diversas fuentes de datos genera bases complejas que deben almacenarse, analizarse y vincularse de manera eficiente. En la Facultad de Ciencias Biológicas de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, se trabaja desde la investigación por medio de proyectos de investigación con los alumnos de la Licenciatura en Biología y la Maestría en Ciencias Biológicas en el desarrollo de sus tesis de investigación en comunidades rurales, urbanas y periurbanas para resolver alguna de los problemas ambientales que enfrentamos actualmente, siendo crucial la colaboración con disciplinas como las ingenierías y las tecnologías, que apoyen el desarrollo de hardware y software para gestionar bases de datos de forma integrada. Esto facilita la presentación rápida y clara de la información a los actores sociales, responsables de la gestión de recursos naturales en territorios sociales, así como integrar a los tomadores de decisiones gubernamentales, que en conjunto se puedan elaborar estrategias para la conservación de los recursos naturales, basadas en los datos obtenidos del monitoreo local, regional o nacional.

3. Impacto de la informática en la biología

Desde la perspectiva de la investigación biológica, la recolección y actualización de información sobre biodiversidad es fundamental para el estudio y conservación de hábitats, especies y sistemas ecológicos. Hoy en día para este proceso resulta indispensable, por un lado, utilizar métodos y técnicas de trabajo de biólogos y ecólogos, y por otro, considerar las particularidades de los sistemas biológicos terrestres, marinos y de agua dulce. Sin embargo, la obtención y manejo de datos se enfrenta a limitaciones prácticas y económicas al manejar áreas de grandes extensiones con una gran variedad de seres vivos. A pesar de la conexión obvia entre informática, biología y ecología, el desarrollo de herramientas informáticas para almacenar, procesar y compartir información relevante sobre biodiversidad ha tenido un recorrido histórico peculiar. El escaso uso de tecnologías avanzadas como las bases de datos relacionales en biología comparada, se debe en parte al desconocimiento de estas técnicas entre los ecólogos y al desencuentro histórico entre las dos disciplinas.

La implementación de sistemas web de bases de datos relacionales, puede simplificar y asegurar considerablemente la gestión, el almacenamiento y el acceso a información biológica a gran escala, lo cual, facilita una administración más eficaz de los recursos y una cooperación más efectiva entre los distintos centros y grupos de investigación, con un esquema colaborativo dentro de la ciencia. Toda iniciativa en este campo promueve la cooperación entre biólogos, informáticos, matemáticos, ingenieros y otros expertos al darse el intercambio dinámico de pensamientos para la creación de nuevas soluciones a problemas biológicos. Además, promueve la educación de nuevos científicos con competencias en biología y computación, una mezcla muy apreciada en la investigación científica contemporánea. Como ejemplo del aprovechamiento de las herramientas informáticas aplicadas al estudio de la biología, se plantea el uso de la Inteligencia Artificial en el análisis de la evolución de las especies, la IA proporciona una perspectiva revolucionaria y extremadamente potente para entender cómo una especie ha experimentado cambios desde su nacimiento hasta la actualidad. Mediante diversas técnicas y metodologías de análisis, la IA tiene la capacidad de validar y profundizar en los procesos evolutivos, proporcionando herramientas que facilitan el manejo, modelado e interpretación de grandes cantidades de información biológica y genética.

En una ejecución del proceso se puede hacer un análisis de grandes volúmenes de datos genéticos, reconstruir árboles filogenéticos, realizar análisis de rasgos fenotípicos, modelar el proceso evolutivo e identificar procesos evolutivos críticos. Todo ello permite realizar los estudios de evolución molecular y adaptación de

una especie. La secuenciación del ADN nos puede generar enormes cantidades de datos para ser analizados y así poder descubrir relaciones entre genes, los cambios y mutaciones que han ocurrido durante millones de años. Aquí es donde el aprendizaje automático de la Inteligencia artificial resulta de gran utilidad. A partir del registro taxonómico los algoritmos de IA pueden analizar las secuencias del genoma de una especie fósil y aún viviente, para revelar patrones de variación genética. Estos algoritmos pueden identificar mutaciones relevantes, rastrear trayectorias evolutivas y predecir cómo estos cambios genéticos afectarán la fisiología y el comportamiento de una especie a lo largo de su historia. Gracias a la capacidad de la IA para procesar grandes cantidades de información, podemos reconstruir árboles filogenéticos con mayor precisión e identificar ancestros comunes y relaciones entre especies de manera más efectiva.

En el “1er Coloquio Sobre la Tecnología Aplicada al Estudio y Conservación de la Fauna Silvestre”, se ha presentado a los estudiantes y profesores de la UPIITA del Instituto Politécnico Nacional, los trabajos que se han venido realizando por el grupo de expositores, en el caso del INECOL, en cuestión de desarrollo de sistemas, se habló al respecto del registro electrónico de la taxonomía, ya que se tiene como un tema de alta prioridad, considerando que existen seis colecciones de importancia reconocida a nivel nacional e internacional. Existen al interior y colaboradores externos, grupos de investigación que han estudiado por décadas diferentes especies de escarabajos, de micro hongos, de dípteros hematófagos, por ello, se ha formalizado un proyecto estratégico institucional denominado eTaxa, en donde se pretende ordenar y asegurar las bases de datos de la flora y fauna electrónica de México, estudiadas en el Instituto de Ecología e instituciones en colaboración. El objetivo es poder poner en línea los árboles filogenéticos de las especies de estudio de los escarabajos (eScarab), los microhongos (eFunga) con información de su biología, ecología, distribución y estado de conservación, para que estudiantes, investigadores, instituciones y ciudadanía tengan acceso inmediato a la información taxonómica.

Para ello se está desarrollando un esquema de sistemas de bases de datos relacionales, para la organización taxonómica y registro de colecciones biológicas, utilizando plataformas vía web con lenguajes, tales como PHP, JavaScript, HTML, HTML5; bases de datos MySQL, PostgreSQL; librerías y metodologías de vanguardia. A la fecha, se cuenta en la plataforma digital con información detallada de los nombres de 1520 especies y 49 subespecies, liga a datos en GBIF y se trabaja en los diseños de plantillas para cada categoría supra-específica.

4. Áreas de oportunidades de desarrollo tecnológico e informático

El avance tecnológico ha transformado profundamente las estrategias de conservación de la fauna silvestre, no solo optimizando los procesos existentes, sino también abriendo un amplio campo para la innovación tecnológica y el desarrollo de prototipos. Estas tecnologías modernas complementan y potencian los métodos tradicionales, proporcionando nuevas perspectivas y soluciones innovadoras frente a los desafíos actuales. En el Instituto Politécnico Nacional, y en específico en la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Tecnologías Avanzadas (UPIITA), se están desarrollando proyectos que pueden ser implementados en aplicaciones de conservación y monitoreo como se describe en las secciones anteriores. Algunas de las tecnologías que se están implementando en diferentes proyectos y áreas son: la inteligencia artificial, drones y rovers autónomos e inteligentes, control adaptativo para estabilización de robots, redes de sensores inalámbricas, así como sistemas para aplicaciones web y móviles, entre otros. En la Figura 7 se muestran algunos de los proyectos implementados, como lo son un rover inteligente, un enjambre de drones, así como un sistema de análisis topográficos y cultivos inteligentes mediante un UAV y una cámara multiespectral.

La integración de la IA y redes neuronales ofrece múltiples posibilidades para la creación de sistemas avanzados que analicen grandes volúmenes de datos. Por ejemplo, se pueden desarrollar aplicaciones personalizadas que combinen algoritmos de aprendizaje profundo con cámaras trampa para identificar especies locales específicas o monitorear patrones de comportamiento únicos en hábitats específicos. Además, la IA podría integrarse en plataformas móviles para que investigadores y comunidades locales accedan a sistemas de reconocimiento de especies en tiempo real.

La personalización de UAVs con cámaras térmicas, sensores de calidad del aire y dispositivos de recolección de muestras permitiría un monitoreo más integral de los ecosistemas. En el caso de los UGVs (vehículos terrestres no tripulados), podrían desarrollarse prototipos con sistemas modulares que incluyan brazos ro-

bóticos para tareas específicas, como colocar dispositivos de monitoreo en ubicaciones difíciles de alcanzar. El concepto de enjambres de drones abre oportunidades para la creación de sistemas cooperativos inteligentes. Al utilizar algoritmos inspirados en la inteligencia de enjambre, es posible diseñar drones que se coordinen automáticamente para cubrir grandes áreas o realizar misiones simultáneas, como el mapeo de deforestación y la recolección de datos ambientales. Estos enjambres podrían equiparse con tecnologías de transmisión de datos en tiempo real, optimizando la toma de decisiones durante las misiones.



Figura 7 Ejemplos de sistemas no tripulados inteligentes y autónomos desarrollados en la UPIITA-IPN.

Las redes de sensores inalámbricos (WSN) y los transceptores, como LoRa, XBee o NB-IoT, presentan un gran potencial para proyectos innovadores en conservación. Por ejemplo, podrían desarrollarse prototipos de sensores autónomos con energía solar que monitoreen variables ambientales y transmitan datos de forma continua a una base central. Estas redes podrían ampliarse para incluir estaciones meteorológicas portátiles o incluso dispositivos que detecten la presencia de especies mediante señales acústicas o visuales. En cuanto a las cámaras especializadas, como las térmicas infrarrojas y multiespectrales, existe la posibilidad de innovar en dispositivos híbridos que combinen estas tecnologías. Un ejemplo sería el desarrollo de cámaras compactas capaces de alternar entre diferentes modos de captura según las condiciones del entorno. Estas cámaras podrían integrarse en drones o robots para mejorar la eficiencia de los estudios nocturnos y en áreas densamente boscosas. La implementación de servidores y bases de datos en la nube facilita el diseño de plataformas colaborativas. Por ejemplo, podrían desarrollarse sistemas que integren bases de datos globales con aplicaciones locales, permitiendo a los investigadores compartir datos de forma segura y en tiempo real. Estas plataformas también podrían incluir herramientas de análisis predictivo basadas en IA, ayudando a identificar amenazas emergentes para la fauna. Los avances en frameworks modernos de frontend, como React y Angular, abren oportunidades para diseñar interfaces interactivas que faciliten la visualización y el manejo de datos complejos. Por ejemplo, se podrían crear aplicaciones web que muestren mapas dinámicos de distribución de especies en tiempo real o que permitan a los usuarios interactuar con simulaciones de escenarios futuros basados en diferentes variables ambientales.

5. Conclusiones

En consecuencia, la combinación de estas tecnologías no solo incrementa la eficiencia y precisión de los esfuerzos de conservación, sino que también abre un campo amplio para la innovación en México. El desarrollo de prototipos personalizados y la implementación de sistemas integrados permiten abordar problemas complejos de maneras únicas. La colaboración interdisciplinaria entre biólogos, ingenieros e informáticos será clave para aprovechar estas oportunidades y garantizar un futuro sostenible para la flora y fauna silvestres.

Referencias

- [1] Cauzinille, J., Favre, B., Marxer, R., & Rey, A. (2024). *Applying machine learning to primate bioacoustics: Review and perspectives*. American Journal of Primatology 86. <https://doi.org/10.1002/ajp.23666>
- [2] Getza, W., & D. Saltz. (2008). *A framework for generating and analyzing movement paths on ecological landscapes*. Proceedings of the National Academy of Sciences. 105(49): 19066-19071.
- [3] Hidalgo, M. & L. Olivera. (2011). *Radio telemetría de vida silvestre. pp. 178-220 In: S. Gallina y C. López (eds.). Manual de técnicas para el estudio de la fauna*. Universidad Autónoma de Querétaro-Instituto de Ecología, A. C. Querétaro, México.
- [4] Lahoz-Monfort, J. J., & Magrath, M. J. (2021). *A comprehensive overview of technologies for species and habitat monitoring and conservation*. BioScience, 71(10), 1038-1062.
- [5] Mandujano, S. (2017). *Monitoreo de la biodiversidad de mamíferos en áreas naturales protegidas empleando cámaras-trampa: sugerencias de herramientas para la gestión y el análisis numérico de las fotos*. Paracuaria Natural 5:24-33.
- [6] Mandujano, S., Pazmany, M., & Rísquez-Valdepeña, A. (2017). *Drones: una nueva tecnología para el estudio y monitoreo de fauna y hábitats*. Agroproductividad. 2017; 10: 79–84., 10(10), 79-84.
- [7] Meek, P., Fleming, P., Ballard, G., Banks, P., Claridge, A., Sanderson, J., & Swann, D. (2014). *Camera trapping: wildlife management and research*. Csiro Publishing.
- [8] Méndez M. (2000). *Vocal variation on allopatric and sympatric populations of Howlers monkey Alouatta and its use for phylogenetic analysis*. Laboratory Primate Newsletter 39: (2)15-16.
- [9] Munari, D. P., Keller, C., & Venticinque, E. M. (2011). *An evaluation of field techniques for monitoring terrestrial mammal populations in Amazonia*. Mammalian Biology 76, 401-408.
- [10] O'Connell, A. F., Nichols, J. D., & Karanth, K. U. (2011). *Camera Traps in Animal Ecology: Methods and Analyses*. Springer.
- [11] Prosekov, A., Kuznetsov, A., Rada, A., & Ivanova, S. (2020). *Methods for monitoring large terrestrial animals in the wild*. Forests 11(8), 808.
- [12] Stowell, D. (2022). *Computational bioacoustics with deep learning: A review and roadmap*. PeerJ, 10, 1–46. <https://doi.org/10.7717/peerj.13152>
- [13] Wallace, G., Elden, M., Boucher, R., & Phelps, S. (2022). *An automated radiotelemetry system (ARTS) for monitoring small mammals*. Methods in Ecology and Evolution 13(5), 976-986.
- [14] Wang, D., Shao, Q., & Yue, H. (2019). *Surveying wild animals from satellites, manned aircraft and unmanned aerial systems (UASs): A review*. Remote Sensing 11(11), 1308.
- [15] White, G., & R. Garrott. (1990). *Analysis of Wildlife Radio-Tracking Data* pp 1-126. Academic Press. USA.
- [16] Zimmermann, A., Zimmermann, E., Newman, J. D., & Jürgens, U. (1995). *Artificial neural networks for analysis and recognition of primate vocal communication. In Current topics in primate vocal communication* (pp.29–46). Springer.
- [17] Zwerts, J. A., Stephenson, P. J., Maisels, F., Rowcliffe, M., Astaras, C., Jansen, P. A., & van Kuijk, M. (2021). *Methods for wildlife monitoring in tropical forests: Comparing human observations, camera traps, and passive acoustic sensors*. Conservation Science and Practice 3, 12: e568.

Mandujano, S., Vera, R., Rísquez-Valdepeña, A., Méndez-Cárdenas, G., Zavaleta, A., López-Téllez, C. (2026). TECNOLOGÍAS APLICADAS EN EL ESTUDIO Y CONSERVACIÓN DE LA FAUNA SILVESTRE: BREVE REVISIÓN Y OPORTUNIDADES DE DESARROLLO. Boletín UPIITA. año XX, (NÚM) 2026.