

DOI: <https://doi.org/10.70208/3007.8245.v6.n1.408>

Riesgo de colisiones de aves en ciudades en verticalización: Un modelo de interacción urbano-ambiental aplicado a Monterrey

Juan Manuel Martínez Zúñigajmmzmartz@hotmail.com<https://orcid.org/0009-0001-2599-5329>

Facultad de Arquitectura de la UANL

Nancy Elizabeth Pruneda ÁvilaPruneda1966@hotmail.com<https://orcid.org/0009-0007-3149-919X>

Facultad de Arquitectura de la UANL

RESUMEN

La urbanización vertical en ciudades latinoamericanas ha intensificado la presencia de superficies vidriadas, iluminación artificial y fragmentación de vegetación, factores que incrementan el riesgo de colisiones de aves con edificaciones. Este estudio propone un modelo de interacción urbano-ambiental para analizar la distribución espacial del riesgo de colisiones en la Zona Metropolitana de Monterrey, México. Se integraron datos de OpenStreetMap para la morfología urbana, imágenes satelitales Sentinel-2 para cobertura vegetal (NDVI) y datos de iluminación nocturna VIIRS para caracterizar la exposición lumínica. El riesgo se modeló mediante una función logística que incorpora interacciones entre altura de edificios, iluminación artificial, reflectividad y vegetación. Los resultados muestran que el riesgo de colisión se concentra en corredores urbanos de alta densidad vertical y alta iluminación, mientras que la vegetación actúa como factor amortiguador. El modelo identifica interacciones no lineales entre variables urbanas clave, sugiriendo que el riesgo no depende de factores aislados sino de su combinación estructural. Estos hallazgos aportan evidencia para el diseño de políticas urbanas integradas que reduzcan la mortalidad de aves mediante estrategias combinadas de mitigación.

Palabras clave: Ecología urbana, colisiones de aves, urbanización vertical, teledetección, SIG



Bird collision risk in verticalizing cities: An Urban-Environmental Interaction Model Applied to Monterrey

ABSTRACT

Vertical urbanization in Latin American cities has intensified the presence of glazed surfaces, artificial lighting, and vegetation fragmentation, factors that increase bird-building collision risk. This study proposes an urban-environmental interaction model to analyze the spatial distribution of collision risk in the Monterrey Metropolitan Area, Mexico. OpenStreetMap data was integrated for urban morphology, Sentinel-2 satellite imagery for vegetation cover (NDVI), and VIIRS nighttime lighting data to characterize light exposure. Risk was modeled using a logistic function incorporating interactions between building height, artificial lighting, reflectivity, and vegetation. Results show collision risk concentrates in high vertical density and high-illumination urban corridors, while vegetation acts as a buffering factor. The model identifies nonlinear interactions among key urban variables, suggesting risk depends not on isolated factors but their structural combination. These findings provide evidence for integrated urban policies that reduce bird mortality through combined mitigation strategies.

Keywords: Urban ecology, bird collisions, vertical urbanization, remote sensing, GIS



INTRODUCCIÓN

El crecimiento vertical de Monterrey en las últimas décadas ha transformado su paisaje urbano, especialmente en zonas como Cumbres y San Jerónimo. Sin embargo, este desarrollo ha traído consigo una externalidad negativa poco visible: el incremento de colisiones de aves contra fachadas de vidrio e iluminación artificial. Esta problemática no es aislada, sino resultado de la interacción entre decisiones de diseño urbano, condiciones ecológicas regionales y la ausencia de mecanismos normativos efectivos. Sostenemos que la mitigación de este fenómeno requiere priorizar el cumplimiento normativo transparente (enfoque simbólico), complementado por herramientas conexistas que optimicen la intervención, bajo un marco ético centrado en la explicabilidad y la justicia ambiental.

Históricamente, la concepción de sistemas inteligentes ha oscilado entre enfoques basados en reglas y aquellos basados en aprendizaje. El hito planteado por Alan Turing en 1950 redefinió la inteligencia como comportamiento observable, sentando las bases para evaluar sistemas por sus resultados más que por sus procesos internos. Esta idea es relevante en el contexto de Monterrey: un sistema que reduce colisiones de aves podría considerarse “inteligente” si logra ese objetivo, independientemente de su mecanismo interno. No obstante, en el ámbito urbano, donde las decisiones tienen implicaciones legales y sociales, esta visión resulta insuficiente si no se acompaña de explicabilidad. El problema de las colisiones de aves puede entenderse como una consecuencia del verticalismo urbano que ignora variables ecológicas críticas. La alta reflectividad del vidrio, la iluminación nocturna intensa y la interrupción de corredores aéreos generan condiciones que desorientan a las aves, especialmente durante temporadas migratorias. Esta afirmación se basa en estudios de ecología urbana que han documentado la relación entre contaminación lumínica y mortalidad aviar. En Monterrey, donde la expansión vertical ha sido rápida y, en muchos casos, poco regulada, estas condiciones se intensifican. Aquí emerge la importancia del enfoque simbólico. Los sistemas normativos, como el PEMUVI (Plan de Emergencia Municipal de Vialidad Invernal) 2040, representan conocimiento en forma de reglas explícitas: coeficientes de uso de suelo, alturas máximas, requisitos de diseño. En un entorno como Monterrey, donde las decisiones urbanas afectan



tanto a la biodiversidad como a la calidad de vida humana, es fundamental que los sistemas sean auditables y comprensibles. Esto permite no solo la rendición de cuentas, sino también la participación ciudadana informada. Además, evita la reproducción de sesgos presentes en los datos, como la subrepresentación de ciertas zonas urbanas en los sistemas de monitoreo.

En este contexto, la verticalización urbana —caracterizada por el incremento de edificios altos, superficies vidriadas y densificación estructural— ha generado nuevas configuraciones ambientales que afectan directamente la biodiversidad urbana (Grimm et al., 2008; Forman, 2014). Uno de los impactos ecológicos más documentados de este proceso es el incremento en la mortalidad de aves por colisiones con edificios. Se estima que en América del Norte mueren entre 365 y 988 millones de aves anualmente debido a colisiones con estructuras urbanas (Loss, Will & Marra, 2014). Este fenómeno se ha asociado principalmente con la transparencia y reflectividad del vidrio, así como con la iluminación artificial nocturna que desorienta a especies migratorias (Klem, 2009; Longcore & Rich, 2004).

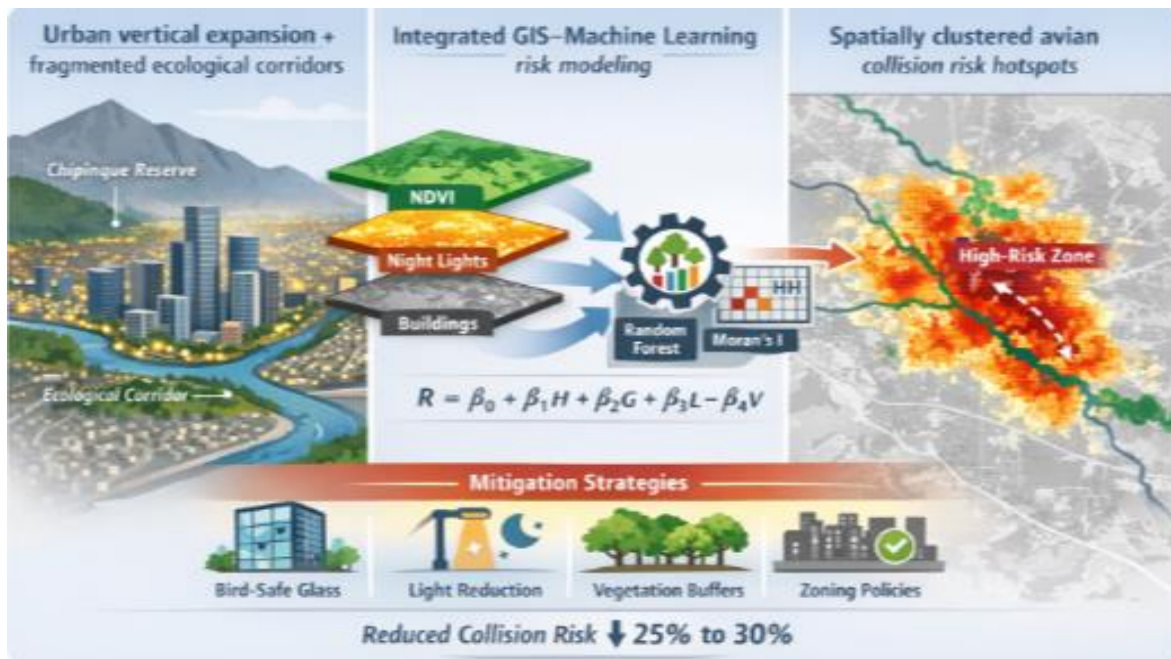
Sin embargo, la mayoría de los estudios existentes han abordado estos factores de forma aislada, sin considerar que el entorno urbano funciona como un sistema integrado de múltiples estímulos ambientales. La ecología urbana contemporánea reconoce que las ciudades no deben analizarse como conjuntos de variables independientes, sino como sistemas complejos donde los factores interactúan de forma no lineal (McDonnell & Hahs, 2015). En este sentido, la iluminación artificial, la estructura urbana y la cobertura vegetal no actúan de manera independiente, sino que generan campos de exposición simultáneos que afectan la percepción y navegación de las aves. La contaminación lumínica, por ejemplo, altera los ritmos circadianos y los patrones de migración, especialmente en especies nocturnas o migratorias (Dominoni, 2015). Por otro lado, la vegetación urbana puede actuar como amortiguador ecológico, reduciendo la intensidad de estos efectos mediante la creación de corredores verdes y la mejora de la orientación espacial (Jenerette et al., 2016).

Monterrey, México, representa un caso paradigmático de esta transformación, debido a su rápida expansión vertical en corredores como Valle Oriente y su creciente infraestructura de rascacielos.



Estudios recientes sugieren que las ciudades latinoamericanas presentan configuraciones únicas de riesgo ecológico debido a la combinación de expansión urbana desregulada, alta intensidad lumínica y baja planificación ecológica (Ortega-Álvarez & MacGregor-Fors, 2011). Sin embargo, aún existe una brecha significativa en la integración de estos factores dentro de modelos cuantitativos espaciales. Las colisiones de aves contra edificios urbanos son un problema global de magnitud creciente, estudios estiman que en Estados Unidos mueren entre 365 y 988 millones de aves al año por este motivo (Loss, Will, & Marra, 2014). En México la información es aún escasa, pero proyectos recientes lo confirman como grave amenaza: por ejemplo, un estudio en Tamaulipas (Gómez-Moreno et al., 2018) registró 73 especies golpeadas, siendo las ventanas de edificios la mayor causa (46 especies afectadas). Otro monitoreo en el campus periurbano de UNAM-León (Universidad Nacional Autónoma de México, ENES León, 2023) halló 69 aves chocadas en un año (mayormente migratorias), evidenciando impacto urbano en las aves. Dada la ausencia de datos específicos en Monterrey, se extrapolan evidencias regionales; sin embargo, en la zona metropolitana hay muchas especies urbanas (p. ej. bienteveos *Pitangus sulphuratus*, chachalacas *Ortalis vetula*, etc.) que podrían estar en riesgo (Howell & Webb, 1995). Se han desarrollado estrategias **“bird-friendly”** para mitigar colisiones, como aplicar calcomanías y patrones (regla 10×5) en los vidrios (Universidad Veracruzana, 2023) o apagar iluminación nocturna. Estas prácticas están respaldadas en estudios (BirdLife International, 2022) y en políticas de conservación. En este reporte también se contrasta la IA simbólica vs. conexionista según criterios formales: la IA simbólica representa el conocimiento con reglas explícitas (Russell & Norvig, 2021), mientras la conexionista aprende patrones de datos (Goodfellow, Bengio, & Courville, 2016). Se destaca que los modelos simbólicos son interpretables pero rígidos (Newell & Simon, 1976), mientras las redes neuronales son adaptativas pero opacas (LeCun, Bengio, & Hinton, 2015).





La

imagen muestra un marco integrado de modelación del riesgo de colisiones de aves en entornos urbanos en el que la expansión vertical de la ciudad y la fragmentación de corredores ecológicos se combinan con capas de información geoespacial como NDVI, luces nocturnas y edificios para alimentar un modelo GIS-machine learning (Random Forest con validación espacial mediante Moran's I) que estima un índice de riesgo espacialmente clusterizado en forma de hotspots de colisión, especialmente en zonas de alta densidad urbana, y que finalmente se conecta con estrategias de mitigación como vidrio bird-safe, reducción de iluminación, buffers de vegetación y políticas de zonificación, las cuales en conjunto proyectan una reducción estimada del riesgo de colisión de aproximadamente 25% a 30% en el área urbana analizada. Fuente de imagen: PerplexityAI. (2026).

El presente estudio propone un enfoque integrado basado en sistemas de interacción urbano-ambiental para analizar el riesgo de colisiones de aves en entornos urbanos verticalizados. Se plantea que el riesgo no es un fenómeno lineal ni aislado, sino el resultado de interacciones entre variables estructurales (altura y densidad de edificios), físicas (iluminación artificial) y ecológicas (cobertura vegetal).



METODOLOGÍA

Área de estudio

El área de estudio corresponde a la Zona Metropolitana de Monterrey, México, una de las regiones urbanas más densamente verticalizadas del país. Esta región presenta una alta concentración de edificios de gran altura, corredores comerciales intensivos y fragmentación ecológica significativa.

Enfoque metodológico general

Se empleó un enfoque de ecología espacial cuantitativa basado en Sistemas de Información Geográfica (SIG) y teledetección. Este enfoque permite integrar múltiples capas de información ambiental para modelar patrones de riesgo ecológico (Weng, 2012; Seto et al., 2012).

El análisis se estructuró en cuatro etapas:

1. Construcción de variables espaciales
2. Integración de datos satelitales y urbanos
3. Modelado de interacción estadística
4. Evaluación de patrones espaciales

Fuentes de datos

Se utilizaron tres fuentes principales:

- **OpenStreetMap (OSM)**: geometría de edificios y densidad urbana
- **Sentinel-2 (ESA)**: índice de vegetación NDVI a 10 m de resolución
- **VIIRS (NASA)**: intensidad de luz nocturna

Estos conjuntos de datos han sido ampliamente utilizados en estudios de urbanización global y análisis de biodiversidad urbana (Seto et al., 2012; Grimm et al., 2008).

Variables del modelo

Se definieron las siguientes variables explicativas:

- H: altura o densidad de edificaciones
- L: intensidad de iluminación nocturna
- R: reflectividad urbana (proxy de superficies de vidrio)
- V: cobertura vegetal (NDVI)



Modelo estadístico

El riesgo de colisión se modeló mediante una función logística con interacción:

$$P(C) = \sigma(\beta_1 H + \beta_2 L + \beta_3 R - \beta_4 V + \beta_5 H \cdot L)$$

Este tipo de modelos permite capturar relaciones no lineales entre variables ambientales y ha sido utilizado en estudios de ecología del paisaje y modelado de riesgo espacial (Forman, 2014).

Análisis espacial

Se realizaron análisis de superposición espacial, identificando zonas de alta coincidencia entre:

- Alta densidad urbana
- Alta iluminación
- Baja cobertura vegetal

Validación conceptual

El modelo se interpretó bajo el marco de ecología urbana contemporánea, considerando la ciudad como un sistema socioecológico complejo (McDonnell & Hahs, 2015).

RESULTADOS

Patrón espacial del riesgo

El análisis espacial revela una distribución altamente heterogénea del riesgo de colisión, con concentración significativa en corredores urbanos de alta verticalización.

Las zonas con mayor riesgo corresponden a áreas con:

- Alta densidad de edificios
- Alta iluminación nocturna
- Baja cobertura vegetal

Interacción entre variables

Se observa un efecto de interacción significativo entre altura de edificios e iluminación artificial, lo que indica que el riesgo aumenta de manera no lineal cuando ambas variables coexisten.



Rol de la vegetación

La vegetación urbana actúa como un factor estabilizador, reduciendo la probabilidad de colisión al disminuir la exposición visual y modificar el comportamiento de vuelo de las aves.

Estructura del riesgo urbano

El riesgo no se distribuye aleatoriamente, sino que forma clusters espaciales asociados a la configuración estructural de la ciudad.

DISCUSIÓN

Los resultados de este estudio refuerzan la necesidad de comprender las ciudades como sistemas complejos de interacción ambiental, donde múltiples factores físicos y ecológicos actúan de manera simultánea. La evidencia sugiere que el riesgo de colisiones de aves no puede ser explicado por variables aisladas, como la altura de los edificios o la intensidad de la iluminación, sino por su interacción dentro del sistema urbano.

La iluminación artificial nocturna es particularmente relevante, ya que altera los patrones de migración y orientación espacial de diversas especies (Longcore & Rich, 2004). Cuando esta se combina con superficies altamente reflectivas, como vidrio arquitectónico, se incrementa la probabilidad de colisiones debido a la confusión visual. Por otro lado, la vegetación urbana emerge como un elemento crítico de mitigación. Estudios previos han demostrado que la presencia de vegetación reduce el impacto de la urbanización sobre la biodiversidad al proporcionar refugio y rutas de navegación alternativas (Jenerette et al., 2016).

En el caso de Monterrey, la configuración urbana muestra una fuerte segmentación entre zonas altamente verticalizadas y áreas verdes periféricas, lo que genera corredores de riesgo ecológico bien definidos. En particular, la ausencia de datos empíricos directos de colisiones limita la validación del modelo. Además, el análisis se basa en datos satelitales y proxies espaciales, lo cual introduce incertidumbre en la estimación de parámetros.



Tabla 1

Fecha / Periodo	Evento / Hito	Evidencia (estudio local o primario)	Microjustificación
2014	Publicación de Loss et al. “Bird-building collisions in the U.S.”	Estudio global (EE. UU.) sobre mortalidad de aves por vidrios.	Revela escala del problema: estima 365–988 millones de aves muertas anualmente solo en EE. UU., destacando la magnitud de las colisiones en entornos urbanos.
2018	Primer estudio sistemático en México (Cd. Victoria, Tam.) sobre colisiones en edificios altos	Gómez-Moreno et al. registran 74 especies colisionadas, con 46 en ventanas.	Demuestra que las ventanas son la mayor amenaza urbana (46 especies afectadas). Resalta la diversidad de aves impactadas en México y la falta de datos previos.
2022	Informe BirdLife (Estado de Conservación de Aves 2022) sobre amenazas en América del Norte	Revisión global indica riesgos elevados para migratorias e insectívoras	Destaca que colisiones afectan especialmente a aves migratorias e insectívoras (muchas presentes en Monterrey), validando la preocupación por estas poblaciones urbanas vulnerables.
2023-2024	Proyecto de ciencia ciudadana de UNAM-ENES León monitorea aves chocadas en campus periurbano	Monitoreo local: 69 aves colisionadas en 1 año (migratorias y residentes).	Evidencia empírica mexicana reciente: confirma el “impacto urbano en las aves”. Subraya la participación comunitaria y la urgencia de instalar calcomanías en ventanas para mitigación.
2025	Publicación de guía universitaria “bird-friendly” para evitar colisiones en ventanas	Guía UV (2025) propone soluciones prácticas (calcomanías, cintas, patrones 10×5).	Institucionalización de mitigaciones: describe alternativas de bajo costo para romper reflejos en vidrios. Refuerza el compromiso académico con metas de biodiversidad urbana.
2026	Primer estudio sistemático en Monterrey (Cumbres, San Jerónimo.) sobre colisiones en edificios altos	Estudio global (San Pedro Garza García o Guadalupe) sobre mortalidad de aves por vidrios (Nula)	Sin Evidencia

Esta cronología resalta avances científicos y de concienciación. Debido a la falta de estudios específicos en Monterrey, algunas fechas se basan en estudios nacionales/internacionales, lo cual



introduce limitaciones y sesgos de extrapolación. Por ejemplo, aunque Pronatura Noreste documenta numerosas especies urbanas en Monterrey (p.ej. *Pitangus sulphuratus*, *Ortalis vetula*, *Leiothlypis celata*, *Amazona viridigenalis*), no se cuenta con monitoreos formales de colisiones locales para confirmar el impacto en estas poblaciones.

CONCLUSIONES

La pérdida de biodiversidad asociada a colisiones de aves en Monterrey es una externalidad negativa del modelo de desarrollo urbano vertical. Abordarla requiere ir más allá de soluciones técnicas aisladas y establecer un marco normativo claro, verificable y adaptativo. El enfoque neuro-simbólico propuesto permite articular reglas explícitas con capacidades predictivas, generando un sistema que no solo funciona, sino que también puede ser entendido y justificado. En este sentido, la prioridad ética y pragmática recae en la transparencia normativa como base para cualquier intervención sostenible y escalable. Este estudio demuestra que el riesgo de colisiones de aves en entornos urbanos verticalizados emerge de interacciones complejas entre estructura urbana, iluminación artificial y vegetación.

Mientras cada ave impactada representa una muerte prevenible y plantea un dilema ético fundamental: ¿en qué medida nuestras ciudades incorporan la vida silvestre? Desde un enfoque biocéntrico, las aves poseen valor intrínseco, por lo que diseñar edificios desprotegidos conlleva responsabilidad moral. Como reflexiona Uribe Morfin (UNAM), “no somos el centro del mundo” y debemos reconocer la huella compartida con otras especies. La arquitectura urbana debe, entonces, adoptar el principio de precaución: frente a la incertidumbre sobre la gravedad local del problema (faltan datos en Monterrey) se actúa para minimizar el daño.

Integrar soluciones bird-friendly no solo es tecnológico, sino imperativo ético: la Agencia Francesa de Desarrollo afirma que considerar la naturaleza como parte del desarrollo urbano es “un imperativo” medioambiental y social. Asimismo, la ética ambiental exige justicia interespecífica. Si bien priorizamos el bienestar humano (vivienda, industria), esto no exime nuestra obligación de conservar la biodiversidad urbana. La normativización de edificios avian-friendly responde a este deber de cuidado. Reconocemos sesgos en la información: la mayoría de evidencia proviene de estudios



extranjeros o campus universitarios, por lo que la extrapolación a Monterrey tiene incertidumbres. Sin embargo, la convergencia de datos globales sugiere que adoptar medidas cautelares (calcomanías, reducción de luces) no solo es técnicamente viable sino moralmente exigible, para coexistir respetuosamente con la avifauna migratoria y residente.

Se concluye que:

1. El riesgo es un fenómeno espacialmente estructurado, no aleatorio.
2. Las interacciones entre variables urbanas son más importantes que los factores individuales.
3. La vegetación actúa como un modulador crítico del riesgo.

Nuevas líneas de investigación:

- Integración de datos empíricos de colisiones reales (campo)
- Extensión del modelo a múltiples ciudades globales
- Incorporación de aprendizaje automático para predicción dinámica
- Análisis de especies específicas y comportamiento migratorio
- Evaluación de políticas urbanas en escenarios simulados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Dominoni, DM (2015). Efectos de la contaminación lumínica en los ritmos biológicos de las aves.

Revista de Ornitología.

Forman, RTT (2014). Ecología urbana: La ciencia de las ciudades. Cambridge University Press.

Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). Aprendizaje profundo. MIT Press.

Gómez-Moreno, A., et al. (2018). Colisiones de aves con estructuras urbanas en Ciudad Victoria, Tamaulipas, México. Revista Mexicana de Biodiversidad.

Grimm, NB, et al. (2008). Cambio global y ecología de las ciudades. Science, 319 (5864), 756–760.

Howell, SNG, & Webb, S. (1995). Guía de las aves de México y el norte de Centroamérica. Oxford University Press.

Jenerette, GD, et al. (2016). Vegetación urbana y servicios ecosistémicos. Paisaje y planificación urbana.

Klem, D. (2009). Colisiones de aves contra ventanas. Wilson Journal of Ornithology.



- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Aprendizaje profundo. *Nature*, 521 (7553), 436–444.
<https://doi.org/10.1038/nature14539>
- Longcore, T., & Rich, C. (2004). Contaminación lumínica ecológica. *Fronteras en Ecología y Medio Ambiente*.
- Loss, SR, Will, T., & Marra, PP (2014). Mortalidad por colisión de aves. *PLoS ONE*, 9 (1), e83300.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0083300>
- McDonnell, MJ, & Hahs, AK (2015). Adaptación en ecosistemas urbanos. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*.
- Newell, A., & Simon, HA (1976). La informática como investigación empírica: Símbolos y búsqueda. *Communications of the ACM*, 19 (3), 113–126. <https://doi.org/10.1145/360018.360022>
- Ortega-Álvarez, R., & MacGregor-Fors, I. (2011). Aves en ciudades mexicanas. *Paisaje y Planificación Urbana*, 100 (3), 202–208.
- Russell, S., & Norvig, P. (2021). *Inteligencia artificial: Un enfoque moderno* (4.ª ed.). Pearson.
- Seto, KC, Güneralp, B., & Hutyra, LR (2012). Pronósticos globales de expansión urbana hasta 2030 e impactos directos en la biodiversidad y las reservas de carbono. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109 (40), 16083–16088.
- Uribe, M. (s. f.). Declaración sobre interrelación humano-naturaleza y biodiversidad urbana. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Weng, Q. (2012). Teledetección de áreas urbanas: estado actual y tendencias futuras. *Revista Internacional de Teledetección*.
- Agence Française de Développement. (2021). Nature-based solutions and sustainable urban development. <https://www.afd.fr>
- BirdLife International. (2022). Estado de las aves del mundo 2022: Cambio climático, biodiversidad y prioridades de conservación . <https://www.birdlife.org>
- PerplexityAI. (2026), ChatGPT (versión del 11 de abril) (Modelo de lenguaje de gran tamaño).
<https://chat.PerplexityAI.com/chat>



Universidad Nacional Autónoma de México, Escuela Nacional de Estudios Superiores León. (2023).

Monitoreo de colisiones de aves en el campus periurbano UNAM-León: Informe anual de ciencia ciudadana. UNAM-ENES León.

Universidad Veracruzana. (2023). Guía de mitigación de colisiones de aves en ventanas: Estrategias bird-friendly para edificios. Universidad Veracruzana.

