



Impact Assessment and Project Appraisal

IAIA
International Association
for Impact Assessment



2025, VOL. 43, NO. 5, 354-365

Facilitar el escrutinio público de los informes de EIA mediante datos abiertos e inteligencia artificial: perspectivas a partir de un estudio de caso mexicano

Joaquín Giménez^a, Tatiana Merino-Benítez^a, Luis A. Bojórquez-Tapia^a, Fernando Esponda-Darlington^b, y Tila M. Pérez^c

^a Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad, Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México; ^b Departamento de Computación, Instituto Tecnológico Autónomo de México, Ciudad de México, México; ^c Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México

Giménez, J., Merino-Benítez, T., Bojórquez-Tapia, L. A., Esponda-Darlington, F., & Pérez, T. M. (2025). Facilitating public scrutiny of EIA reports with open data and artificial intelligence: insights from a Mexican case study. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 43(5), 354–365. <https://doi.org/10.1080/14615517.2025.2534281>

This article is a translation of an article published in *Impact Assessment and Project Appraisal* 1 August 2025 © IAIA, available online: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14615517.2025.2534281>.

Este artículo es una traducción de un artículo publicado en *Impact Assessment and Project Appraisal* 1 agosto 2025 © IAIA, disponible en línea: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14615517.2025.2534281>.

Resumen

El escrutinio público es una piedra angular de la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), pero la complejidad técnica de sus metodologías a menudo limita la capacidad de las partes interesadas para revisar de manera sustantiva los informes de EIA. Este artículo presenta un método práctico que integra datos abiertos (DA), inteligencia artificial (IA) y análisis comparativo de la valoración de la relevancia o significancia de impactos con el fin de determinar si las principales fuentes de incertidumbre se abordan adecuadamente en los informes de EIA. Aplicamos este método al caso del Tren Maya, centrándonos en una revisión técnica-científica del informe de EIA aprobado por las autoridades ambientales mexicanas. Demostramos cómo este método puede emplearse para examinar la incertidumbre epistémica y ontológica en la evaluación de impactos sobre la biodiversidad. Este método permite identificar debilidades en los juicios de expertos, la calidad de los datos y la adhesión a los principios fundamentales de la EIA. Los resultados indican que el informe de EIA subestimó los impactos sobre la biodiversidad y presentó inconsistencias metodológicas en la calificación y agregación de los indicadores de impacto. En general, las herramientas DA-IA sustentan el escrutinio basado en evidencia bajo restricciones procedimentales, mientras que el análisis comparativo pone en relieve los riesgos de juicios sesgados o inconsistentes en las metodologías convencionales de la EIA. El método es transparente, operativamente accesible y adaptable a otros ámbitos y contextos de la EIA.

Aspectos clave

- El binomio DA-IA sustenta el escrutinio público de los informes de EIA.
- Los DA permiten una evaluación eficiente de los datos de línea base sobre biodiversidad.
- La IA permite realizar evaluaciones rastreables y respaldadas por la literatura científica sobre la relevancia o significancia de impactos.
- El análisis comparativo evalúa la conformidad del juicio de expertos con los principios fundamentales de la EIA.

Introducción

La evaluación del impacto ambiental (EIA) enfrenta a importantes retos en su papel como una herramienta para abordar las complejas problemáticas ambientales y sociales del siglo XXI (Bice y Fischer, 2020). Estos retos son especialmente marcados en los países en desarrollo, donde la escasez de recursos, la debilidad institucional y las limitaciones en capacidades técnicas reducen significativamente su eficacia (Kolhoff et al., 2009; Briggs y Hudson 2013; Nadeem et al. 2014). Asimismo, la consulta pública y la participación de las partes interesadas a menudo no alcanzan los objetivos previstos, pese a constituir etapas procedimentales fundamentales en el proceso de la EIA. Aunque estos mecanismos se conciben para fomentar la inclusión y la transparencia (Glucker et al. 2013; Eckerd 2017; Loomis et al. 2022), suelen verse limitados por un alcance restringido, información poco accesible y tiempos insuficientes para una revisión exhaustiva de las evaluaciones de impacto (Shepherd y Bowler 1997; Cashmore et al. 2004).

En México, por ejemplo, los estudios de EIA suelen realizarse en plazos breves (de uno a cuatro meses) y enfrentan limitaciones derivadas de la escasez de recursos financieros, la insuficiencia de datos de línea base y la falta de experiencia técnica (Bojórquez-Tapia 1989; Bojórquez-Tapia y García 1998). Estas restricciones suelen dar lugar a informes que privilegian descripciones detalladas de los factores ambientales y las actividades del proyecto, mientras emplean las matrices de impacto cruzado como herramienta principal de evaluación (Holling 1978; Bojórquez-Tapia y Ongay-Delhumeau 1992; Cashmore et al. 2004; Toro et al. 2013). Además, el marco legal acota la participación pública, ya que solo contempla un período de consulta de 20 días hábiles para que las partes interesadas revisen y comenten el informe de EIA. Este breve plazo ha obstaculizado de manera sistemática la posibilidad de realizar revisiones exhaustivas y sustantivas, reduciendo así la eficacia de la participación pública

¹ CONTACT Luis A. Bojórquez-Tapia bojorquez@ecologia.unam.mx Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad, Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ap. Postal 70-275, 04510 Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México.

Los datos complementarios de este artículo pueden consultarse en línea en <https://doi.org/10.1080/14615517.2025.2534281> EVALUACIÓN DE IMPACTO Y VALORACIÓN DE PROYECTOS <https://doi.org/10.1080/14615517.2025.2534281>

© 2025 Los autores. Publicado por Informa UK Limited, que opera como Taylor & Francis Group. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite adecuadamente la obra original. Los términos en los que se ha publicado este artículo permiten la publicación del manuscrito aceptado en un repositorio por parte de los autores o con su consentimiento.

en el proceso de EIA.¹

Por su parte, el proceso de EIA en México incluye un mecanismo formal para incorporar aportes de expertos en la toma de decisiones. Las autoridades ambientales suelen solicitar, de manera no remunerada, a organismos consultivos e instituciones académicas reconocidas revisiones técnico-científicas, fundamentadas en evidencia y en argumentos profesionales. El propósito de dichas revisiones es verificar si el informe de EIA presenta una justificación sólida para la aprobación del proyecto. No obstante, el plazo estricto de 15 días hábiles para entregar estas revisiones, junto con el acceso limitado a los datos subyacentes, reduce considerablemente la capacidad de los expertos independientes para llevar a cabo revisiones exhaustivas y bien informadas.

Más allá de las restricciones procedimentales, el escrutinio público de los informes de EIA para proyectos de infraestructuras a gran escala se dificulta aún más por la imprevisibilidad inherente de los sistemas socioambientales complejos y sus interacciones en múltiples escalas espaciales (Bojórquez-Tapia et al. 2022). Las incertidumbres en la EIA provienen de dos fuentes principales. La primera es la incertidumbre epistémica, que surge de limitaciones en los datos y los vacíos de conocimiento, como inventarios de especies incompletos o estudios de la línea base insuficientes. La segunda es la incertidumbre ontológica, originada de la imposibilidad de prever las in-

teracciones sinérgicas en los ecosistemas, los efectos en cascada de las transformaciones territoriales a gran escala y sus consecuencias a largo plazo.

Estas limitaciones e incertidumbres ponen en duda el grado en que los informes de EIA se apegan a principios fundamentales, como el uso de la mejor evidencia científica disponible, la correcta aplicación de los métodos de evaluación de impacto y la observancia del principio precautorio (Shrader-Frechette y McCoy 1994; Lemons et al. 1997). Esto subraya la urgente necesidad de contar con métodos que permitan un escrutinio público sustantivo de los informes de EIA, dentro de las limitaciones procedimentales existentes.

Presentamos un método práctico para fortalecer el escrutinio público de los informes de EIA, tomado como caso de estudio el megaproyecto Tren Maya en México (Figura 1). Este método integra datos abiertos (DA), inteligencia artificial (IA) y análisis comparativo de los métodos de evaluación de impacto, con el propósito de determinar de manera sistemática si las deficiencias en la atención a las incertidumbres epistémica y ontológica comprometen el cumplimiento de los principios fundamentales de la EIA. El desarrollo de este método parte de los hallazgos de la revisión técnico-científica del informe de EIA correspondiente al Tramo 5 Sur, encargada por las autoridades ambientales mexicanas al LANCIS (Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad).

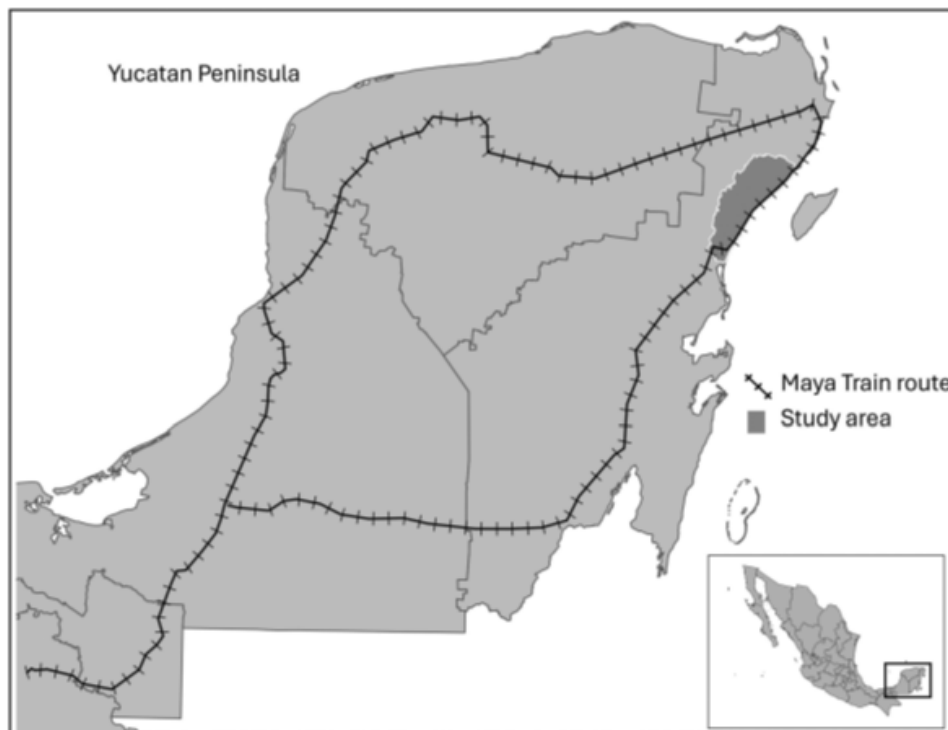


Figura 1. Área de estudio

Tabla 1. Indicadores de impacto y sus valores respectivos

Indicador de Intensidad (<i>In</i>)	Variable lingüística				
	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	Total
Extensión (<i>Ex</i>)	Aislado	Disperso	Extendido	Total	Total
Momento (<i>Mo</i>)	A largo plazo	A mediano plazo	Inmediato	Crítico	Crítico
Persistencia (<i>Pe</i>)	Breve	Temporal	Permanente		
Reversibilidad (<i>Rv</i>)	Sí	Moderado	No		
Sinergia (<i>Sy</i>)	No	Sí	Alta		
Acumulación (<i>Ac</i>)	No		Sí		
Efecto (<i>Ef</i>)	Indirecto		Directo		
Periodicidad (<i>Pr</i>)	No	Regular	Continua		
Recuperación (<i>Rc</i>)	Inmediato	A mediano plazo	Mitigable	Durarero	
Valor	1	2	4	8	12

Nuestra intención no es ofrecer una evaluación exhaustiva del complejo contexto procedimental asociado con el proyecto Tren Maya en su conjunto, ni analizar su conformidad legal. Por el contrario, nos centramos en presentar un caso ilustrativo que demuestra cómo nuestro método puede fortalecer el escrutinio técnico-científico de las evaluaciones de impacto sobre la biodiversidad dentro las limitaciones del mundo real.

Los resultados demuestran la utilidad de las herramientas de DA e IA para evaluar sistemáticamente la calidad de los datos de línea base sobre biodiversidad y la consistencia interna de la valoración de indicadores de impacto derivadas del juicio experto. Del mismo modo, el análisis comparativo destaca la importancia metodológica de emplear técnicas de evaluación de impacto basadas en la teoría de medición, a fin de preservar la coherencia semántica de las categorías de relevancia o significancia de impacto.

Estudio de caso Tren Maya

El Tren Maya es un proyecto de infraestructura a gran escala que consiste en la construcción de una línea ferroviaria de 1500 km para conectar las principales ciudades y facilitar el transporte de pasajeros y mercancías en la península de Yucatán. Este proyecto tiene implicaciones importantes para la Selva Maya, un extenso bosque tropical que abarca aproximadamente 100 000 km² en México, Belice y Guatemala. La densa selva tropical, la diversidad de ecosistemas y la rica biodiversidad de esta región conforman un hábitat crucial para numerosas especies,

muchas de ellas endémicas o en peligro de extinción. Sin embargo, el proyecto ha suscitado críticas y preocupaciones por su impacto ambiental, especialmente en lo que respecta a la deforestación y la fragmentación de ecosistemas, ya que conllevan una gama más amplia de impactos ambientales. Estos impactos no se limitan a la destrucción directa del hábitat, sino que incluyen diversos impactos indirectos, como alteraciones en la dinámica de las especies, los ciclos del agua y la conectividad ecológica entre hábitats.

Informes de EIA

En México, los informes de EIA se componen de ocho capítulos (SEMARNAT 2019). Nuestro análisis se centró en los capítulos II, IV y V del informe de EIA correspondiente al Tramo 5 Sur. El capítulo II describe las actividades relacionadas con la construcción y operación del ferrocarril, que comprende una longitud de 68 km. El capítulo IV presenta los datos de línea base utilizados para la evaluación de impactos, así como el diagnóstico de las condiciones ambientales y las tendencias de cambio dentro de un área de estudio de 1 890 km² (Figura 1). El capítulo V detalla la metodología empleada para la evaluación de impactos.

Según lo expuesto en el capítulo V, se utilizó la matriz de impactos cruzados propuesta por Conesa Fernández-Vitoria (2009) como principal herramienta de evaluación. En términos generales, estas matrices organizan y representan de forma sistemática las interacciones entre los factores ambientales (como el agua, el aire, el suelo y la fauna) y las actividades del proyecto (como el desmonte

de terrenos, la construcción de carreteras e instalaciones y la operación del ferrocarril). Mediante una escala subjetiva, el equipo responsable de la evaluación de impactos asignó valores a las celdas de la matriz, indicando el grado de intensidad del efecto de cada acción sobre cada factor ambiental, con base en un conjunto de indicadores de relevancia o significancia del impacto (Holling 1978; Toro et al. 2013).

La matriz de impacto cruzado comprendió 29 factores ambientales y 18 actividades del proyecto, lo que resultó en 522 interacciones potenciales. De ellas, 280 se identificaron como relevantes para una evaluación más detallada.

Para cada una de estas interacciones, se recurrió al juicio de expertos para evaluar 10 indicadores, cada uno medido mediante escalas diferentes (Tabla 1). Posteriormente, se calculó la relevancia o significancia del impacto, S , de una actividades del proyecto sobre un factor ambiental mediante una combinación lineal ponderada (Conesa Fernández-Vitoria 2009; Toro et al. 2013):

$$S = 3In + 2Ex + Mo + Pe + Rv + Sy + Ac + Ef + Pr + Rc \quad (1)$$

Las calificaciones de impacto variaron dentro del rango $13 \leq S < 100$ y se clasificaron en categorías de relevancia o significancia {L (baja), M (moderada), H (alta) y VH (muy alta)}, de acuerdo con los siguientes umbrales (Conesa Fernández-Vitoria 2009; Toro et al. 2013):

$$S' = \{L \leq 25, M \leq 50, H \leq 75, VH \leq 100\}$$

Métodos

Realizamos un análisis detallado del informe de EIA correspondiente al Tramo 5 Sur (Figura 1), bajo las condiciones del procedimiento de revisión de 15 días hábiles establecidas para el período de escrutinio. Con fines ilustrativos, centramos el análisis en la interacción entre la actividad del proyecto “desmonte de terrenos” y el factor ambiental “fauna”, ambos incluidos en la matriz de impactos cruzados. Examinamos si las definiciones de las actividades del proyecto y de los factores ambientales en la metodología de evaluación de impactos (Capítulo V) se correspondían con la descripción del proyecto (Capítulo II) y con los datos de la línea base y el diagnóstico ambiental (Capítulo IV). Para verificar si el capítulo IV incor-

poraba la mejor evidencia científica disponible relevante para abordar la incertidumbre epistémica, digitalizamos el mapa del área de estudio a fin de realizar consultas de DA en los portales GBIF (Global Biodiversity Information Facility) e iNaturalist. La búsqueda se limitó a los registros de especies protegidas dentro del área de estudio definida por la NOM-059-SEMARNAT-2010. Las consultas se restringieron a “especímenes preservados” en GBIF, referentes a datos procedentes de colecciones biológicas institucionales, y a “observaciones con grado de investigación” en iNaturalist, las cuales representan datos de alta calidad, verificados públicamente y comparables a los registros científicos estándar.

Seleccionamos GBIF e iNaturalist para este estudio porque ofrecen acceso libre e inmediato a datos abundantes sobre biodiversidad, que abarcan una amplia gama de grupos taxonómicos. GBIF, una infraestructura global de datos respaldada por instituciones científicas, universidades y agencias gubernamentales, proporciona bases de datos de alta calidad validas por especialistas, colecciones de museos e inventarios gubernamentales de biodiversidad, lo que garantiza la precisión taxonómica y la estandarizados de los datos. Por su parte, iNaturalist, con casi tres millones de usuarios, ofrece un seguimiento de la biodiversidad en tiempo real y observaciones verificadas por la comunidad con “calidad de investigación”, que se integran automáticamente en GBIF. Ambas plataformas de datos abiertos gozan de un amplio reconocimiento en el ámbito de la conservación de la biodiversidad, gracias a su cobertura global y alta fiabilidad, especialmente en el caso de especies de vertebrados (White et al. 2023; Gallagher et al. 2024; López-Guillén et al. 2024). El valor científico y la credibilidad de iNaturalist se evidencian, además, en su uso generalizado en la investigación, con más de 4000 artículos científicos que citan sus registros (Global Biodiversity Information Facility 2024).

Para verificar si el capítulo V reflejaba una implementación adecuada de los métodos de evaluación de impacto, seleccionamos un subconjunto de especies protegidas provenientes de DA para su análisis posterior y designamos a la paloma silvestre, *Columba livia*, como especie de control, bajo la premisa de que su nivel de impacto no debería exceder la categoría de “bajo”, dada su condición de especie introducida, altamente adaptable y resistente, que prospera en entornos urbanos.

Desde el punto de vista operativo, la IA se implementó en Perplexity (2024) mediante dos *prompts*, denominados PROMPT 1 y PROMPT 2 (un *prompt* es una instrucción o consulta estructurada que orienta al modelo de IA en la

generación de resultados basados en criterios específicos). Estos *prompts* definieron los objetivos, parámetros y expectativas del modelo, garantizando que el contenido generado fuera pertinente y sustentado en datos confiables.

El PROMPT 1 se diseñó para dar prioridad a la literatura científica arbitrada, proveniente de bases de datos indexadas (por ejemplo, Web of Science, Scopus y Google Scholar), relevantes para el área de estudio y las especies evaluadas. Se excluyeron las fuentes no arbitradas, salvo en casos en que no existieran otros datos disponibles, a fin de preservar la transparencia. La IA fue instruida para utilizar esta literatura en la evaluación de los 10 indicadores de impacto (Tabla 1) para un conjunto de especies especificado por el usuario. Cada evaluación debía estar respaldada por referencias bibliográficas. Cuando no se disponía de información directa, la IA infería los impactos potenciales a partir de datos sobre el hábitat y las amenazas, asegurando que toda la literatura de apoyo fuera arbitrada. Los detalles de este proceso se describen en el Apéndice A.

El PROMPT 2 definió el formato de salida como un archivo de Excel, en el que las filas correspondían a las especies y las columnas a los indicadores de impacto. Además, se solicitó un texto justificativo que explicara el valor asignado a cada indicador para cada especie (Apéndice B).

Para verificar el cumplimiento con el principio precautorio, empleamos un método alternativo de agregación de los indicadores de impacto y de evaluación de la relevancia o significancia del impacto, con el propósito de minimizar las predicciones de falsos negativos asociadas con la incertidumbre ontológica. En consecuencia, aplicamos una combinación no lineal de cinco indicadores de impacto del informe de EIA (Tabla 1) para obtener calificaciones de relevancia o significancia del impacto, S , dentro del rango $0 \leq S \leq 1$ (Bojórquez-Tapia y García 1998, Bojórquez-Tapia et al. 2002):

$$S = I^{1-k}$$

$$I = \frac{1}{3}(In + Ex + Mo)$$

donde

$$k = \frac{1}{2}(Sy + Ac)$$

Cada indicador de impacto se evaluó mediante una escala cardinal con cinco categorías {VL (muy bajo), L (bajo), M (moderado), H (alto), VH (muy alto)}, con valores diseñados para minimizar los errores de omisión y garantizar la coherencia con las limitaciones cognitivas y la sensibilidad perceptiva humana:

$$\{VL = 0.06, L = 0.13, M = 0.25, H = 0.50, VH = 1\}$$

Las calificaciones de relevancia o significancia del impacto, S , se clasificaron utilizando la misma escala cardinal y los umbrales correspondientes a cada categoría:

$$S' = \{VL \leq 0.06, L \leq 0.13, M \leq 0.25, H \leq 0.50, VH \leq 1\}$$

Esta escala cardinal se fundamentó en la ley de Miller y la ley de Weber-Fechner, dos principios ampliamente reconocidos de la psicofísica (Lootsma 1999; Saaty 2001). Estos principios proporcionan una representación numérica teóricamente justificada de las magnitudes de impacto— la ley de Miller establece que las personas pueden procesar y recordar eficazmente 7 ± 2 categorías; la ley de Weber-Fechner describe la relación logarítmica entre la magnitud de los estímulos (los impactos, en este caso) y su importancia percibida.

Resultados

Evidencia científica

La consulta en los DA arrojó 67,232 registros para el área de estudio, de los cuales solo el 0.5 % correspondía a especies protegidas. La comparación entre los resultados de los DA con los datos del capítulo IV reveló que el informe de EIA subestimó la presencia de especies protegidas en el área de estudio (Figura 2, Tabla 2). En total, se registraron 193 especies protegidas en la región de estudio, pero el informe de EIA incluyó únicamente un tercio de las especies reportadas por GBIF y la mitad de las registradas en iNaturalist (Figura 2).

El análisis de IA reforzó estos hallazgos al evaluar la relevancia o significancia del impacto para especies como *Pionopsitta haematotis* (loro de capucha marrón) y *Onychorhynchus coronatus* (papamoscas real), revelando que sus requerimientos de hábitat y su vulnerabilidad a la deforestación no fueron debidamente considerados en el informe de EIA (véase Materiales Complementarios 2).

El informe de EIA registró menos especies en todos los grupos taxonómicos en comparación con GBIF e iNatural-

ist, observándose las mayores discrepancias en invertebrados, aves, plantas y reptiles (Tabla 2). En total, el informe de EIA documentó solo un tercio de las especies protegidas registradas en GBIF y la mitad de las reportadas en iNaturalist. En la categoría de protección especial, el informe de EIA incluyó menos de la mitad de las especies registradas en ambas plataformas. Para la categoría de especies amenazadas, el informe de EIA documentó una cuarta parte de las especies registradas en GBIF y menos de la mitad de las registradas en iNaturalist. Finalmente, en la categoría “en peligro”, el informe de EIA reportó menos de la mitad de las especies presentes en GBIF y solo un tercio de las registradas en iNaturalist.

Método de evaluación de impacto

La matriz de impactos cruzados utilizada en el informe de EIA presentó importantes inconsistencias metodológicas. Nuestro análisis reveló que el orden y el significado de los términos lingüísticos no estaban estandarizados entre los distintos indicadores de impacto, lo que evidencia una dependencia de escalas ordinales (Tabla 1). En particular, el término “total” denotaba el impacto máximo para el indicador de intensidad (In), pero correspondía a la segunda categoría más alta en extensión (Ex). Asimismo, el término «crítico» designaba el impacto máximo tanto para extensión como para momento (Mo), aún cuando este último indicador presentaba menos categorías. El número reducido y desigual de categorías lingüísticas en otros indicadores introdujo inconsistencias adicionales, limitando la comparabilidad entre indicadores. Dado que las escalas ordinales únicamente ordenan las clasifican categorías sin

establecer intervalos con significado uniforme, los valores numéricos asignados carecen de una interpretabilidad consistente.

Además, la asignación de mayores ponderaciones a los indicadores de intensidad y extensión no se justifica de manera clara. Este esquema de ponderación probablemente amplifica los errores potenciales en las evaluaciones de impacto. Por ejemplo, si un impacto se califica con una intensidad “total” y una persistencia “permanente”, el cálculo resultante implica que la intensidad tiene un peso nueve veces mayor que la persistencia. Este desequilibrio, carente de una base empírica sólida, debilita la consistencia de los resultados, un aspecto que con frecuencia pasa inadvertido en la práctica.

Esta cuestión puede ilustrarse con el siguiente ejemplo hipotético: si un impacto se califica como “total” en intensidad ($In = 12$) y “permanente” en persistencia ($Pe=4$), la calificación de relevancia o significancia resultante ($3In + Pe = 3(12) + 1 \times 4 = 40$) indica que la intensidad aporta nueve veces más que la persistencia a la calificación de la relevancia o significancia total del impacto. Esta ponderación produce resultados contrarios a la intuición al momento de ajustar los valores de impacto. Por ejemplo, reducir la persistencia a la categoría mínima ($Pe=1$, breve) apenas disminuye la calificación de relevancia o significancia (de 40 a 37), mientras que reducir la intensidad a la segunda categoría más alta ($In=8$; muy alta) provoca una disminución sustancial (de 40 a 28). Este desequilibrio complica la interpretación de la relevancia o significancia del impacto y las disyuntivas que implican las medidas de mitigación o compensación. Desde el punto de vista del escrutinio público, plantea la interrogante de por qué una

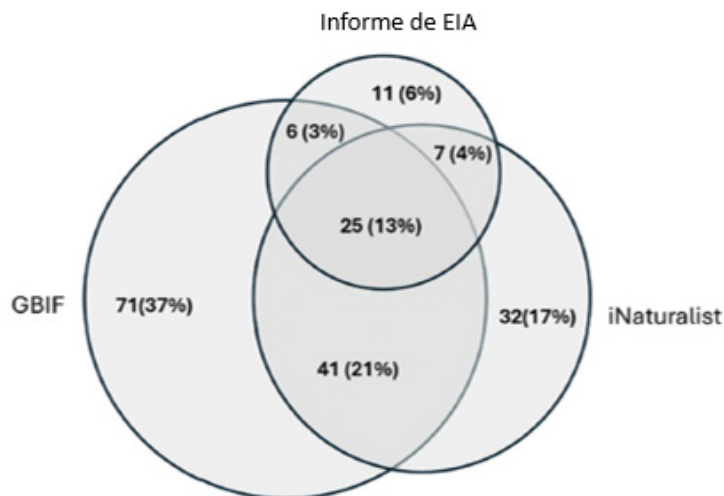


Figura 2. Diagrama de Venn que compara el número de especies protegidas registradas en el informe de EIA, la Base de Datos Mundial sobre Biodiversidad (GBIF) e iNaturalist. Los porcentajes indican la proporción de especies en cada categoría en relación con el total del conjunto de datos.

Tabla 2. Número de especies por categoría de protección y fuente de información.

Taxon	Categoría por fuente								
	Protección especial			Amenazadas			En peligro		
	GBIF	iNaturalist	Informe EIA	GBIF	iNaturalist	Informe EIA	GBIF	iNaturalist	Informe EIA
Plantas	5	2	1	22	10	3	6	1	2
Invertebrados	1	1	0	5	3	0	0	1	0
Anfibios	6	6	4	0	0	0	0	0	0
Aves	26	30	12	13	9	4	4	6	1
Peces	3	1	1	5	2	1	5	1	0
Mamíferos	2	2	1	1	5	2	4	5	3
Reptiles	24	13	9	10	6	5	1	1	0
	67	55	28	56	35	15	20	15	6

actividad que causa impactos muy elevados y permanentes obtendría una relevancia o significancia menor que otra que causa impactos totales pero de corta duración.

Apego al principio precautorio

La discrepancia entre los juicios de expertos en el informe de EIA y las evaluaciones generadas con IA sugiere un incumplimiento del principio precautorio. A diferencia del informe de EIA, las evaluaciones generadas con IA (Tabla 3) se sustentaron en referencias bibliográficas verificables (véase el Material complementario 2) y asignaron de manera consistente calificaciones más altas a los indicadores de impacto periodicidad (Pe), reversibilidad (Rv), sinergia (Sy) y acumulación (Ac). Por ejemplo, mientras que el informe de EIA clasifica el impacto sobre *Amazona oratrix* (loro amazónico de cabeza amarilla) como moderado, la calificación generada con IA lo considera de muy alto impacto, dada la especificidad del hábitat de la especie, la irreversibilidad de la deforestación y su estatus de especie en peligro de extinción. De manera similar, la IA identificó a *Spizaetus ornatus* (águila elegante) como al-

tamente vulnerable, debido a su dependencia de hábitats forestales extensos y sin perturbación, un requerimiento ecológico que no fue considerado adecuadamente en el informe de EIA.

Excepto en el caso de intensidad (In), las calificaciones de los indicadores de impacto en el informe de EIA coincidían estrechamente con las asignadas por la IA a la especie de control, *C. livia*, en lugar de corresponder con las calificaciones máximas generadas por la IA. Además, el contraste entre la especie control y las calificaciones máximas generadas con IA reflejó las diferencias esperadas entre especies introducidas y protegidas (tablas 3 y 4). De manera notable, las calificaciones de los indicadores en el informe de EIA y de la especie de control (*C. livia*) eran casi idénticas, excepto para en el caso del indicador intensidad, mientras que las calificaciones máximas generadas por IA fueron sistemáticamente más altas (Tabla 4). Estas inconsistencias sugieren que el informe de EIA probablemente subestimó los impactos sobre las especies protegidas, debido a la incertidumbre epistémica y las limitaciones metodológicas de su enfoque.

Tabla 3. Resultados del PROMPT 2

Especies	Indicadores de Impacto									
	In	Ex	Mo	Pe	Rv	Sy	Ac	Ef	Pr	Rc
<i>Onychorhynchus coronatus</i>	8	4	4	4	4	4	4	4	4	8
<i>Lepidochelys olivacea</i>	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
<i>Nephrolepis cordifolia</i>	4	4	4	4	4	1	1	4	4	4
<i>Pionopsitta haematotis</i>	4	4	4	4	4	1	1	4	4	4
<i>Amazona oratrix</i>	8	8	4	4	4	4	4	4	4	8
<i>Spizaetus tyrannus</i>	8	4	4	4	4	4	4	4	4	4
<i>Spizaetus ornatus</i>	8	4	4	4	4	4	4	4	4	4
<i>Jabiru mycteria</i>	8	4	4	4	4	4	4	4	4	4
<i>Sarcoramphus papa</i>	8	4	4	4	4	4	4	4	4	4
<i>Cairina moschata</i>	4	4	4	4	4	4	4	4	2	4

Las calificaciones de relevancia o significancia de impacto en el informe de EIA fueron inferiores a las obtenidas mediante el método de evaluación alternativo (Tabla 4). La calificación del informe de EIA apenas superó el umbral de “moderado” a “alto”, mientras que la calificación máxima generada con IA rebasó el límite entre “alto” y “muy alto”.

evaluación de impacto y minimizar diagnósticos falsos negativos, en consonancia con el principio precautorio (Shrader-Frechette y McCoy 1994; Lemons et al. 1997).

Coincidimos en que la integración de los DA y la IA representa un avance significativo en el proceso de EIA (Beatrice Oyinkansola Khan y Muhammad Nawaz 2023; Adalakun et al. 2024). Estas tecnologías fortalecen la

Tabla 4. Comparación entre los métodos de evaluación de los indicadores de impacto (Tabla 1) y las calificaciones de relevancia o significancia de impacto (S) y su clasificación (S') para los impactos del desmonte sobre la fauna, utilizando las calificaciones de los indicadores de la MIA , el máximo generado con IA (IA-máx) y el generado con IA para las especies de control.

Método de Evaluación	Calificación del indicador de impacto										Relevancia	
	<i>In</i>	<i>Ex</i>	<i>Mo</i>	<i>Pe</i>	<i>Rv</i>	<i>Sy</i>	<i>Ac</i>	<i>Ef</i>	<i>Pr</i>	<i>Rc</i>	<i>S</i>	<i>S'</i>
Combinación lineal ponderada												
Informe EIA	8	4	4	2	1	2	1	4	4	1	51	<i>H</i>
IA-máx	8	8	4	4	4	4	4	4	4	8	76	<i>VH</i>
Control	2	4	4	4	1	1	1	4	2	1	32	<i>M</i>
Combinación no lineal												
Informe EIA	0.50	0.25	0.50	–	–	0.50	0.06	–	–	–	0.53	<i>VH</i>
IA-máx	0.50	0.50	0.50	–	–	1.00	1.00	–	–	–	1.00	<i>VH</i>
Control	0.13	0.25	0.25	–	–	0.06	0.06	–	–	–	0.23	<i>M</i>

Discusión

A pesar de ser un componente fundamental del proceso de EIA, el escrutinio público sigue siendo particularmente difícil de lograr en el contexto de inversiones de infraestructura a gran escala, como el Tren Maya. Su eficacia se ve debilitada tanto por las incertidumbres inherentes a este tipo de proyectos como por las restricciones procedimentales que limitan la participación de las partes interesadas (Bojórquez-Tapia et al. 2022). En México, los breves períodos de consulta, el acceso restringido a la información y los recursos limitados con frecuencia dificultan que las partes interesadas realicen revisiones exhaustivas de los informes de EIA.

Si bien nuestros hallazgos confirman las críticas recurrentes sobre las limitaciones de las metodologías de la EIA para abordar eficazmente las incertidumbres epistémicas y ontológicas inherentes a los proyectos de infraestructura de gran escala (Balint et al. 2011; Gómez-Priego y Bojórquez-Tapia 2023), también destacan la necesidad de contar con métodos eficientes que faciliten el escrutinio público de los informes de EIA. Estos métodos deben aplicarse para verificar el cumplimiento de los principios fundamentales de la EIA: utilizar la mejor evidencia científica disponible, implementar adecuadamente técnicas de

participación de las partes interesadas al facilitar evaluaciones basadas en evidencia (Hirn et al. 2022; Sandfort et al. 2024). En línea con estudios previos, nuestros resultados confirman la utilidad de los DA para obtener bases de datos científicas de alta calidad y acceso libre (Fecher y Friesike, 2014), así como la capacidad de la IA para procesar grandes volúmenes de literatura científica y otras fuentes relevantes, con el propósito de identificar patrones, evaluar riesgos y mejorar la comprensión de los impactos relevantes o significativos (Adalakun et al. 2024; Sandfort et al. 2024). Si bien reconocemos la cautela señalada por Bond et al. (2024) respecto a la dependencia excesiva de la IA, sostenemos que nuestro enfoque contribuye a promover procesos de EIA abiertos y equitativos. A pesar de los retos actuales relacionados con la especificidad de los datos y la transparencia algorítmica, nuestros resultados destacan el valor de la IA para agilizar la recopilación y el análisis de información, reduciendo de manera significativa el tiempo y el esfuerzo necesarios para obtener y procesar datos ambientales de alta calidad (Kim 2024).

En cuanto a si el informe de EIA del Tren Maya se basó en la mejor evidencia científica disponible, utilizamos las plataformas de datos abiertos GBIF e iNaturalist como referencia para la comparación. Estas plataformas pro-

porcionaron amplias bases de datos sobre especies protegidas que no fueron consideradas en el informe de EIA (Tabla 2; material complementario 1). Este vacío de información evidenció una marcada subrepresentación de especies protegidas, lo que sugiere un alto nivel de incertidumbre epistémica que probablemente contribuyó a la subestimación de los posibles impactos del proyecto sobre la biodiversidad.

Estos resultados respaldan observaciones previas sobre la utilidad de plataformas como GBIF e iNaturalist para abordar temas e interrogantes relacionados con la conservación de la biodiversidad (Hochmair et al. 2020; Rodrigues et al. 2020; Soteropoulos et al. 2021). Al restringir las consultas a “especímenes preservados” en GBIF y a “observaciones de grado de investigación” en iNaturalist, demostramos la subrepresentación de la biodiversidad en la base de datos del informe de EIA. Coincidimos, por tanto, con Pocock et al. (2018) en que plataformas como GBIF e iNaturalist ofrecen datos sólidos y confiables para su aplicación en la EIA. Conforme a Sandfort et al. (2024), sostenemos que se debió emplear la identificación y clasificación automatizada de especies para generar series de datos a largo plazo que respaldaran el monitoreo de las medidas de compensación y mitigación descritas en el informe de EIA. Aunque la ausencia de sistemas globales armonizados para integrar los datos sobre biodiversidad sigue siendo una limitación (Geijzendorffer et al. 2020), estos enfoques proporcionan conocimientos prácticos y aplicables para la conservación de la biodiversidad.

Reconocemos que, si bien la dependencia de GBIF en especímenes preservados ofrece un criterio de calidad sólido, las “observaciones de grado de investigación” de iNaturalist están sujetas a una mayor variabilidad. Es particularmente significativo que solo el 22 % de las especies protegidas registradas en GBIF también fueran reportadas en el informe de EIA, lo que evidencia una brecha considerable en los datos sobre biodiversidad utilizados en el informe de EIA. Esta discrepancia plantea preocupaciones sobre la posible subestimación de la biodiversidad presente en el área del proyecto, un aspecto que amerita una investigación más profunda, pese a las limitaciones de datos que aún persisten.

En cuanto al método de evaluación de impactos, encontramos que la matriz de impactos cruzados (Conesa Fernández- Vitoria 2009; Toro et al. 2013) no resulta adecuada para abordar la incertidumbre ontológica. Siguiendo a Holling (1978), reconocemos el valor de las herramientas cualitativas en contextos de escasez de datos, ya que permiten recoger juicios de expertos sobre cómo las ac-

tividades del proyecto afectan a los componentes ambientales. No obstante, el principal reto de este tipo de herramientas radica en la traducción de juicios cualitativos a estimaciones cuantitativas. De acuerdo con la teoría de medición (Stevens 1946; Luce y Tukey, 1964), la asignación de valores numéricos a las evaluaciones de expertos requiere considerar explícitamente: (1) las reglas de asociación de numerales, (2) las propiedades matemáticas de la escala y (3) las operaciones matemáticas válidas aplicables a dicha escala. Sin embargo, la matriz de impactos cruzados aplicada en el informe de EIA se basa en escalas ordinales para los 10 indicadores de impacto (Tabla 1), lo que viola los principios fundamentales de la teoría de medición. En primer lugar, no garantiza el isomorfismo representacional, es decir, la correspondencia uno a uno necesaria entre las observaciones empíricas y su representación matemática. En segundo lugar, compromete la integridad estructural de los datos ordinales al asignar ponderaciones a categorías que carecen de propiedades de intervalo. Finalmente, el uso de una combinación lineal ponderada para agregar datos ordinales resulta matemáticamente inválido.

En consecuencia, la aplicación de una combinación lineal ponderada para agregar los indicadores de impacto comprometió tanto la fiabilidad como la validez del constructo de las calificaciones de relevancia o significancia del impacto obtenidas. La validez del constructo se refiere al grado en que la agregación ponderada representa con precisión el constructo teórico de la relevancia o significancia del impacto, un concepto abstracto que no puede observarse directamente (Cronbach y Meehl, 1955). Esto, a su vez, puso en entredicho la legitimidad del informe de EIA.

Al menos en parte, las calificaciones consistentemente más bajas de los 10 indicadores de impacto en el informe de EIA, en comparación con las generadas mediante IA (Tablas 3-4), pueden atribuirse a las limitaciones de las escalas ordinales para captar la incertidumbre ontológica. En el informe de EIA, las calificaciones de los indicadores sugieren un enfoque implícito en especies con mayor tolerancia al hábitat y mayor capacidad de adaptación. Por el contrario, las calificaciones generadas con IA reflejaron la mayor vulnerabilidad de las especies dependientes de hábitats específicos y frágiles, cuya restauración es difícil. En particular, las calificaciones del informe de EIA y de la especie de control (*C. livia*) mostraron valores casi idénticos en todos los indicadores, salvo en el de intensidad, mientras que las calificaciones máximas generadas con IA (AI-max) fueron consistentemente más altas (Tabla 4). Esta

disparidad sugiere una posible subestimación de los impactos en el informe de EIA, probablemente influida por sesgos en contra de las especies con requisitos ecológicos más especializados.

Con relación al apego al principio precautorio, minimizar el riesgo de evaluaciones de impacto con falsos negativos (es decir, errar en la predicción de impactos potenciales) es fundamental para la función anticipatoria de la EIA. Como destacan Lemons et al. (1997) y Shradler-Frechette y McCoy (1994), este principio materializa el imperativo normativo de actuar con cautela ante la incertidumbre científica. Nuestra revisión técnico-científica determinó que el informe de EIA no logró minimizar adecuadamente el riesgo de falsos negativos en predicciones de impacto. Además de que la agregación de calificaciones ordinales para calcular la relevancia o significancia del impacto es matemáticamente inválida, la combinación lineal ponderada produjo las calificaciones de relevancia o significancia más bajas que Al-máx y la combinación no lineal (Tabla 4). Su dependencia de rangos uniformes entre categorías aumentó la probabilidad de errores por omisión. Este efecto se hace evidente cuando se compara con los resultados de la combinación no lineal, basada en una escala cardinal asociada a variables lingüísticas sustentadas en la ley de Weber-Fechner. Dicha escala de razón proporciona representaciones numéricas válidas de las magnitudes de impacto y reduce la probabilidad de errores por omisión al establecer gradaciones más frecuentes entre las categorías de bajo impacto que entre las de alto impacto.

En cuanto a la justificación de los valores de los indicadores generados por la IA, PROMPT 1 instruyó a los modelos a inferir los impactos potenciales sobre el hábitat y las amenazas únicamente cuando estuvieran respaldados por al menos dos fuentes científicas arbitradas (véase el Material Complementario 2). En el caso de los felinos de tamaño mediano de la Península de Yucatán, para los cuales no existen observaciones de campo prolongadas o repetidas, PROMPT 1 indicó el uso de especies análogas. La IA identificó a *Felis silvestris* como un análogo adecuado para los felinos de la región de estudio. Aunque no una especie nativa del Neotrópico, *F. silvestris* comparte rasgos ecológicos clave, como una alta sensibilidad a la fragmentación del hábitat y la dependencia de la conectividad estructural del paisaje, con *Leopardus pardalis* y *Herpailurus yagouaroundi* (Zanin et al., 2014). Esta analogía constituye una inferencia no empírica válida, basada en mecanismos estructuralmente comparables y se alinea al principio de transferibilidad condicional (Shadish et al.

2002), que respalda la extrapolación cuando las condiciones estructurales de los sistemas son funcionalmente equivalentes. Asimismo, el uso de especies análogas cumple los criterios de validez externa propuestos por Patino y Ferreira (2018), que permiten la generalización cuando tanto la estructura del fenómeno como los mecanismos subyacentes son comparables entre los contextos de origen y de destino. En el caso de infraestructura lineal, las respuestas ecológicas de los felinos de tamaño mediano a la fragmentación del hábitat y a la disrupción de la conectividad del paisaje —a través de efectos de borde, formación de barreras y degradación de corredores— están estructuralmente presentes tanto en los paisajes europeos como en los neotropicales.

Los modelos de IA presentan limitaciones inherentes derivadas de los datos de entrenamiento. En este sentido, coincidimos con Longo *et al.* (2024) en que el elemento clave del uso de la IA radica en el desarrollo del *prompt*, un paso que debe llevarse a cabo meticulosamente, ya que determina la relevancia, transparencia y fiabilidad de los resultados generados. En nuestro caso, diseñamos PROMPT 1 con el propósito de restringir el espacio de búsqueda exclusivamente a fuentes pertinentes y confiables para llevar a cabo la revisión técnico-científica del informe de EIA. En particular, el uso de Perplexity, una herramienta que da prioridad a la literatura científica arbitrada, ayudó a garantizar que los resultados estuvieran sustentados en evidencia rastreable y verificable. Si bien no afirmamos que nuestro enfoque haya eliminado las limitaciones epistémicas ni garantizado una objetividad plena, sostenemos que el uso de Perplexity permitió evaluar en qué medida los indicadores basados en juicio expertos divergían del conocimiento académico establecido. Los resultados sugieren que esta divergencia plantea serias dudas sobre por la fiabilidad del informe de EIA.

Reconocemos que el caso del Tren Maya implica un contexto procedimental complejo que excede el alcance de este artículo. En particular, el hecho de que las evaluaciones de impacto se realizaran después del inicio del proyecto generó preocupaciones jurídicas importantes. En respuesta, diversas asociaciones profesionales e instituciones académicas de alto perfil realizaron revisiones independientes de los informes de EIA correspondientes a los diferentes tramos en los que se dividió el proyecto, entre ellas Greenpeace,¹ FEMCOBI (Federación Mexicana de Colegios de Biólogos),² CEMDA (Centro Mexicano de Derecho Ambiental)³ y el Centro para la Diversidad Biológica.⁴ Dada la accesibilidad operativa de nuestro método, estos profesionales, revisores y partes interesadas

podrían haberlo empleado eficazmente para respaldar sus observaciones con análisis basados en evidencia.

Nuestro método puede aplicarse para evaluar otros ámbitos de la EIA más allá de la biodiversidad, mediante la adaptación de los *prompts* e incorporación de bases de datos de acceso abierto relevantes. En el caso del Tren Maya, por ejemplo, dichas bases de datos podrían incluir las del Servicio Geológico Nacional⁵ y la CONAGUA⁶ para los indicadores relacionados con acuíferos kársticos; las de CONEVAL⁷ e INEGI⁸ para los indicadores vinculados con factores socioeconómicos; e incluso las de World Bank Open Data⁹ para indicadores asociados con métricas de desarrollo más amplias. En la misma línea, la aplicabilidad de nuestro método se extiende a casos de justicia ambiental que requieren revisiones técnicas rigurosas de MIA (Bojórquez-Tapia et al. 2025), así como a EIA *ex-post* en el contexto de litigios derivados de desastres medioambientales antropogénicos (Gómez-Priego et al. 2024).

Serán necesarias más investigaciones que evalúen la aplicabilidad y la eficacia de nuestro método para hacer revisiones técnico-científicas de los informes de EIA en otros países que enfrenten condiciones similares a las de México—como la escasez de datos de línea base, plazos de revisión restringidos y autoridades ambientales con recursos limitados. Asimismo, estudios comparativos entre diversos marcos institucionales y jurídicos serán necesarios para determinar en qué medida el método DA-AI puede fortalecer el escrutinio público y mejorar el cumplimiento de los principios fundamentales de la EIA en los distintos contextos nacionales.

Aunque hemos ilustrado la eficacia de nuestro enfoque utilizando una sola interacción de la matriz de impactos cruzados con el fin de ofrecer una explicación más clara, éste puede aplicarse al análisis de una amplia gama de interacciones de impacto en diversas escalas. Para facilitar la reproducibilidad de este análisis, incluimos una plantilla JSON del *prompt* de IA empleado en nuestro estudio de caso (Material complementario 3).

Conclusiones

Este estudio propone y demuestra un procedimiento transparente y replicable para fortalecer el escrutinio público y la revisión técnico-científica de los informes de EIA mediante la integración de DA sobre biodiversidad, la inferencia basada en IA y el análisis crítico de los métodos de evaluación. Aplicado al megaproyecto Tren Maya, el método reveló deficiencias clave en la manera en que el

informe de EIA abordó tanto la incertidumbre epistémica como la ontológica, especialmente en lo relativo a la calificación de la relevancia o significancia de los impactos y la fiabilidad de los datos. La agregación ponderada de escalas ordinales vulneró los principios fundamentales de la teoría de medición, lo que derivó en una validez comprometida del constructo y una fiabilidad cuestionable de las evaluaciones de impacto reportadas.

En conjunto, el método presentado es operativamente accesible para una amplia gama de actores, incluyendo instituciones académicas, asociaciones profesionales y organizaciones de la sociedad civil. Su aplicabilidad se extiende más allá de la biodiversidad hacia otros dominios de impacto mediante la adaptación de los *prompts* y la incorporación de bases de datos relevantes de acceso abierto. Además, este método puede respaldar litigios ambientales y evaluaciones de impacto posteriores a eventos, al fundamentar los reclamos mediante evaluaciones transparentes y basadas en evidencia. Se necesitarán más investigaciones para evaluar la viabilidad y adaptación de este método en otros países con restricciones legales, institucionales y procedimentales comparables en sus sistemas de EIA.

Notas

1. <https://www.greenpeace.org/mexico/publicacion/50955/reporte-tecnico-mia-tren-maya-tramo-5/>.
2. <https://femcobi.org/prensa-1/f/opinion-tecnica-del-tren-maya>.
3. <https://cemda.org.mx/tribunal-ordena-suspensiondefinitiva-para-tramos-5-y-7-del-tren-maya/>.
4. <https://www.biologicaldiversity.org/programs/international/pdfs/An%C3%A1lisis-MIA-Tren-Maya-Tramo-5-Sur-CBD-2022-06-09.pdf>.
5. <https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx>.
6. <https://sih.conagua.gob.mx/>.
7. <https://www.coneval.org.mx/Paginas/principal.aspx>.
8. <https://www.inegi.org.mx/>.
9. <https://data.worldbank.org/>.

Agradecimientos

Este trabajo constituye el cumplimiento parcial de los requisitos para la obtención del título de Doctor en Ciencias de la Sostenibilidad, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), de los autores primero y segundo. El segundo agradece el apoyo de la beca CONAHCYT 1003060 y del Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, UNAM. El primero agradece el apoyo brindado por la Asociación Mexicana de Cultura, A. C. Durante la preparación de este trabajo, los autores uti-

lizaron ChatGPT para mejorar el lenguaje y la legibilidad. Después de utilizar esta herramienta, los autores revisaron y editaron el contenido según fue necesario y asumen toda la responsabilidad por el contenido de la publicación.

Declaración de divulgación

Los autores no han informado de ningún posible conflicto de intereses.

ORCID

Tatiana Merino-Benítez ID <http://orcid.org/0000-0002-7587-1498>

Luis A. Bojórquez-Tapia ID <http://orcid.org/0000-0001-6764-8803>

Fernando Sponda-Darlington ID <http://orcid.org/0000-0001-9602-8662>

Referencias

- Adelakun BO, Antwi BO, Ntiakoh A, Eziefule AO. 2024. Leveraging AI for sustainable accounting: developing models for environmental impact assessment and reporting. *Finance Acc Res J.* 6(6):1017–1048. doi: [10.51594/farj.v6i6.1234](https://doi.org/10.51594/farj.v6i6.1234).
- Balint PJ, Stewart RE, Desai A, Walters LC. 2011. *Wicked environmental problems: managing uncertainty and conflict*. 1st ed. Washington, DC: Island Press/Center for Resource Economics. doi: [10.5822/978-1-61091-047-7](https://doi.org/10.5822/978-1-61091-047-7).
- Bice S, Fischer TB. 2020. Impact assessment for the 21st century—what future? *Impact Assess Proj Apprais.* 38(2):89–93. doi: [10.1080/14615517.2020.1731202](https://doi.org/10.1080/14615517.2020.1731202).
- Bojórquez-Tapia LA. 1989. Methodology for prediction of ecological impacts under real conditions in Mexico. *Environ Manage.* 13(5):545–551. doi: [10.1007/BF01874960](https://doi.org/10.1007/BF01874960).
- Bojórquez-Tapia LA, Eakin H, Reed PM, Miquelajauregui Y, Grave I, Merino-Benítez T, Molina-Pérez E. 2022. Unveiling uncertainties to enhance sustainability transformations in infrastructure decision-making. *Curr Opin Environ Sustainability.* 56:101172. doi: [10.1016/j.cosust.2022.101172](https://doi.org/10.1016/j.cosust.2022.101172).
- Bojórquez-Tapia LA, García O. 1998. An approach for evaluating EIAS-deficiencies of EIA in Mexico. *Environ Impact Assess Rev.* 18(3):217–240. doi: [10.1016/S0195-9255\(98\)00008-0](https://doi.org/10.1016/S0195-9255(98)00008-0).
- Bojórquez-Tapia LA, Juárez L, Cruz-Bello G. 2002. Integrating fuzzy logic, optimization, and GIS for ecological impact assessments. *Environ Manage.* 30(3):418–433. doi: [10.1007/s00267-002-2655-1](https://doi.org/10.1007/s00267-002-2655-1).
- Bojórquez-Tapia LA, Ongay-Delhumeau E. 1992. International lending and resource development in Mexico: can environmental quality be assured? *Ecol Econ.* 5(3):197–211. doi: [10.1016/0921-8009\(92\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0921-8009(92)90001-9).
- Bojórquez-Tapia LA, Pedroza-Páez D, Hernández-Aguilar B. 2025. Incorporating scientific and traditional ecological knowledge into social impact assessment. *Environ Impact Assess Rev.* 114:107947. doi: [10.1016/j.eiar.2025.107947](https://doi.org/10.1016/j.eiar.2025.107947).
- Bond A, Cilliers D, Retief F, Alberts R, Roos C, Moolman J. 2024. Using an Artificial intelligence chatbot to critically review the scientific literature on the use of Artificial intelligence in environmental impact assessment. *Impact Assess Proj Apprais.* 42(2):189–199. doi: [10.1080/14615517.2024.2320591](https://doi.org/10.1080/14615517.2024.2320591).
- Briggs S, Hudson MD. 2013. Determination of significance in ecological impact assessment: past change, current practice and future improvements. *Environ Impact Assess Rev.* 38:16–25. doi: [10.1016/J.EIAR.2012.04.003](https://doi.org/10.1016/J.EIAR.2012.04.003).
- Cashmore M, Gwilliam R, Morgan R, Cobb D, Bond A. 2004. The interminable issue of effectiveness: substantive purposes, outcomes and research challenges in the advancement of environmental impact assessment theory. *Impact Assess Proj Apprais.* 22(4):295–310. doi: [10.3152/147154604781765860](https://doi.org/10.3152/147154604781765860).
- Conesa Fernández-Vitoria V. 2009. *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- Cronbach LJ, Meehl PE. 1955. Construct validity in psychological tests. *Psychol Bull.* 52(4):281–302. doi: [10.1037/h0040957](https://doi.org/10.1037/h0040957).
- Eckerd A. 2017. Citizen language and administrative response: participation in environmental impact assessment. *Adm Soc.* 49:348–373. doi: [10.1177/0095399714548272](https://doi.org/10.1177/0095399714548272).
- Fecher B, Friesike S. 2014. Open science: one term, five schools of thought. In: *Opening science*. Cham (Switzerland):: Springer International Publishing; p. 17–47. doi: [10.1007/978-3-319-00026-8_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-00026-8_2).
- Gallagher R, Roger E, Packer J, Slatyer C, Rowley J, Cornwell W, Ens E, Legge S, Simpfendorfer C, Stephens R, et al. 2024. Incorporating citizen science into IUCN red list assessments. *Conserv Biol.* 39(2):e14329. doi: [10.1111/cobi.14329](https://doi.org/10.1111/cobi.14329).
- Geijzendorffer IR, Regan EC, Pereira HM, Brotans L, Brummitt N, Gavish Y, Haase P, Martin CS, Mihoub J, Secades C et al. 2020. Bridging the gap between biodiversity data and policy reporting needs : an essential biodiversity variables perspective. *J Appl Ecol.* 57 (7): 1341–1350. doi: [10.1111/1365-2664.12417](https://doi.org/10.1111/1365-2664.12417).

- Global Biodiversity Information Facility. 2024. Scientific publications using data from iNaturalist (dataset key: 50c9509d-22c7-4a22-a47d-8c48425ef4a7). <https://www.gbif.org/resource/search?contentType=literature&gbifDatasetKey=50c9509d-22c7-4a22-a47d-8c48425ef4a7>.
- Glucker AN, Driessen PP, Kolhoff A, Runhaar HA. 2013. Public participation in environmental impact assessment: why, who and how? *Environ Impact Assess Rev*. 43:104–111. doi: [10.1016/j.eiar.2013.06.003](https://doi.org/10.1016/j.eiar.2013.06.003).
- Gómez-Priego P, Bojórquez-Tapia LA. 2023. Analytic deliberation approach for collaborative determination of impact significance of projects in dispute, a case study in Mexico. *Environ Impact Assess Rev*. 100:107091. doi: [10.1016/j.eiar.2023.107091](https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107091).
- Gómez-Priego P, Bojórquez-Tapia LA, Domínguez CA, Escalante AE. 2024. Apr. Navigating expert judgment uncertainty in post-event environmental impact assessments for human-made disasters litigation. *Environ Impact Assess Rev*. 106:107511. doi: [10.1016/j.eiar.2024.107511](https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107511).
- Hirn J, Enrique García J, Montesinos-Navarro A, Sánchez-Martín R, Sanz V, Verdú M. 2022. A deep generative Artificial intelligence system to predict species coexistence patterns. *Methods Ecol Evol*. 13(5):1052–1061. doi: [10.1111/2041-210X.13827](https://doi.org/10.1111/2041-210X.13827).
- Hochmair HH, Scheffrahn RH, Basille M, Boone M, Barden P. 2020. Evaluating the data quality of iNaturalist termite records. *PLOS ONE*. 15(5):1–19. doi: [10.1371/journal.pone.0226534](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226534).
- Holling CS, editor 1978. *Adaptive environmental assessment and management*. Toronto: John Wiley & Sons.
- Khan M, Muhammad Nawaz C. 2023. Artificial intelligence and the future of impact assessment. <https://ssrn.com/abstract=4519498>.
- Kim E. 2024. Can data science achieve the ideal of evidence-based decision-making in environmental regulation? *Technol Soc*. 78:102615. doi: [10.1016/j.techsoc.2024.102615](https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2024.102615).
- Kolhoff AJ, Runhaar HA, Driessen PP. 2009. The contribution of capacities and context to EIA system performance and effectiveness in developing countries: towards a better understanding. *Impact Assess Proj Apprais*. 27(4):271–282. doi: [10.3152/146155109X479459](https://doi.org/10.3152/146155109X479459).
- Lemons J, Shrader-Frechette K, Cranor C, Shrader K, Cranor C. 1997. The precautionary principle: scientific uncertainty and type I and type II errors. *Found Sci*. 2(2):207–236. doi: [10.1023/A:1009611419680](https://doi.org/10.1023/A:1009611419680).
- Longo L, Holzinger A, Kieseberg P, Tjoa AM, Zicari RV. 2024. Explainable artificial intelligence (XAI) 2.0: a manifesto of open challenges and interdisciplinary research directions. *Inf Fusion*. 100. doi: [10.1016/j.inffus.2024.101933](https://doi.org/10.1016/j.inffus.2024.101933), 101933.
- Loomis JJ, Bond A, Dziedzic M. 2022. Transformative effectiveness: how EIA can transform stakeholders' frames of reference. *Environ Sci Policy*. 136:207–215. doi: [10.1016/j.envsci.2022.06.007](https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.06.007).
- Lootsma FA. 1999. *Multi-criteria decision analysis via ratio and difference judgement*. Dordrecht, Netherlands: Springer. doi: [10.1007/978-0-585-28008-0_3](https://doi.org/10.1007/978-0-585-28008-0_3).
- López-Guillén E, Herrera I, Bensid B, Gómez-Bellver C, Ibáñez N, Jiménez-Mejías P, Mairal M, Mena-García L, Nualart N, Utjés-Mascó M, et al. 2024. Strengths and challenges of using iNaturalist in plant research with focus on data quality. *Diversity*. 16(1):42. doi: [10.3390/d16010042](https://doi.org/10.3390/d16010042).
- Luce RD, Tukey JW 1964. Simultaneous conjoint measurement: a new type of fundamental measurement. *J Math Psychol*. 1(1):1–27. doi: [10.1016/0022-2496\(64\)90015-X](https://doi.org/10.1016/0022-2496(64)90015-X).
- Nadeem O, Hameed R, Haydar S. 2014. Public consultation and participation in EIA in Pakistan and lessons learnt from international practices. *Pak J Eng Appl Sci*. 14:73–84.
- Patino CM, Ferreira JC 2018. Establishing the internal and external validity of experimental studies. *J Bras Pneumol*. 44(3):183. doi: [10.1590/S1806-37562018000000164](https://doi.org/10.1590/S1806-37562018000000164).
- Perplexity AI. 2024 Sep 14. Response to query on environmental impact assessment for [SPECIES NAME] [AI Assistant]. Perplexity.ai.
- Pocock MJO, Chandler M, Bonney R, Thornhill I, Albin A, August T, Bachman S, Brown PMJ, Cunha DGF, Grez A, et al. 2018. A vision for global biodiversity monitoring with citizen science. In: *Advances in ecological research* Vol. 59, San Diego, CA: Academic Press Inc; p. 169–223. doi: [10.1016/bs.aecr.2018.06.003](https://doi.org/10.1016/bs.aecr.2018.06.003).
- Rodrigues A, Endresen D, Figueira R, Villaverde C, Vega M, King N, Rajvanshi A, Treweek J. 2020. Best practices for publishing biodiversity data from environmental impact assessments. doi: [10.35035/doc-5xdm-8762](https://doi.org/10.35035/doc-5xdm-8762).
- Saaty TL. 2001. *The analytic network process: decision making with dependence and feedback*. Pittsburgh, PA: RWS Publications.
- Sandfort R, Uhlhorn B, Geißler G, Lyhne I, Jiricka-Pürner A. 2024. AI will change EA practice – but are we ready for it? A call for discussion based on developments in collecting and processing biodiversity data. *Impact Assess Proj Apprais*. 42(2):200–208. doi: [10.1080/14615517.2024.2318684](https://doi.org/10.1080/14615517.2024.2318684).

SEMARNAT. 2019. Guía para la elaboración de la Manifestación de Impacto Ambiental Regional. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; https://dsiapps.dev.semarnat.gob.mx/formatos/DGIRA/Guia_MIA-R-DIC-2019.pdf.

Shadish WR, Cook TD, Campbell DT 2002. Experimental and quasi-experimental de signs for generalized causal inference. Boston: Houghton Mifflin and Company. Boston.

Shepherd A, Bowler C. 1997. Beyond the requirements: improving public participation in EIA. *J Environ Plann Manag.* 40(6):725–738. doi: [10.1080/09640569711877](https://doi.org/10.1080/09640569711877).

Shrader-Frechette KS, McCoy ED. 1994. Biodiversity, biological uncertainty, and setting conservation priorities. *Biol Philos.* 9(2):167–195. doi: [10.1007/BF00857931](https://doi.org/10.1007/BF00857931).

Soteropoulos DL, de Bellis CR, Witsell T. 2021. Citizen science contributions to address biodiversity loss and conservation planning in a rapidly developing region. *Diversity.* 13(6):255. doi: [10.3390/d13060255](https://doi.org/10.3390/d13060255).

Stevens SS. 1946. On the theory of scales of measurement. *Science.* 103(2684):677–680. doi: [10.1126/science.103.2684.677](https://doi.org/10.1126/science.103.2684.677).

Toro J, Requena I, Duarte O, Zamorano M. 2013. A qualitative method proposal to improve environmental impact assessment. *Environ Impact Assess Rev.* 43:9–20. doi: [10.1016/j.eiar.2013.04.004](https://doi.org/10.1016/j.eiar.2013.04.004).

White E, Soltis PS, Soltis DE, Guralnick R, Qin H. 2023. Quantifying error in occurrence data: comparing the data quality of iNaturalist and digitized herbarium specimen data in flowering plant families of the southeastern United States. *PLOS ONE.* 18(12):e0295298. doi: [10.1371/journal.pone.0295298](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295298).

Zanin M, Palomares F, Brito D 2014. What we (don't) know about the effects of habitat loss and fragmentation on felids. *Oryx.* 49(1):96–106. doi: [10.1017/S0030605313001609](https://doi.org/10.1017/S0030605313001609).

Apéndices

Apéndice A

INDICACIÓN 1

Por favor, pregúnteme el nombre de la especie que me gustaría buscar. Una vez que le proporcione el nombre de la especie, dé prioridad a la literatura científica revisada por pares de bases de datos indexadas (por ejemplo, Web of Science, Scopus, Google Scholar) que trate los parámetros de evaluación del impacto ambiental de esa especie en relación con la construcción de un ferrocarril en la península de Yucatán. Excluya las fuentes no revisadas por pares, a menos que no haya otra información revisada por pares disponible, y en tales casos, indique claramente el tipo de fuente.

Me interesan especialmente los estudios que evalúan los siguientes parámetros y, cuando sea posible, asignan un valor numérico según estos criterios. Cada valor asignado debe justificarse con una referencia específica, que debe figurar en el Material complementario 2 (S2) para su verificación.

Añada un signo «+» si el efecto es positivo para la especie y un signo «-» si el efecto es negativo:

- Intensidad: El grado de alteración o daño a las poblaciones de [NOMBRE DE LA ESPECIE] causado por las actividades de construcción del ferrocarril. Valores: Bajo (1), Medio (2), Alto (4), Muy alto (8), Total (12).
- Extensión: Área geográfica afectada por la construcción del ferrocarril y su impacto en los hábitats de [NOMBRE DE LA ESPECIE]. Valores: Aislada (1), Dispersa (2), Extendida (4), Total (8), Crítica (12).
- Momento: El momento en que se producen los impactos sobre [NOMBRE DE LA ESPECIE] durante las diferentes fases de la construcción del ferrocarril. Valores: Largo plazo (1), Medio plazo (2), Inmediato (4), Crítico (8).
- Persistencia: Cuánto tiempo persisten los impactos sobre [NOMBRE DE LA ESPECIE] después de su aparición, especialmente tras la finalización de la construcción. Valores: Breve (1), Temporal (2), Permanente (4). Valores: Breve (1), Temporal (2), Permanente (4).
- Reversibilidad: La posibilidad de revertir los impactos sobre [NOMBRE DE LA ESPECIE] y restaurar su

