



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**POSGRADO EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD**

**AVANCES TEÓRICOS Y METODOLÓGICOS EN SISTEMAS DE CONOCIMIENTO  
PARA LA GOBERNANZA DE LA COMPLEJIDAD SOCIOAMBIENTAL: EVALUACIÓN  
DEL IMPACTO AMBIENTAL *EX ANTE* Y *EX POST***

**TESIS**  
**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE**  
**DOCTORA EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD**

**PRESENTA:**  
**PAOLA GÓMEZ PRIEGO**

**TUTOR PRINCIPAL:**  
**DR. LUIS ANTONIO BOJÓRQUEZ TAPIA**  
**INSTITUTO DE ECOLOGÍA, UNAM**

**MIEMBRO DEL COMITÉ TUTOR:**  
**DR. JESÚS MARIO SIQUEIROS GARCÍA**  
**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATEMÁTICAS APLICADAS Y EN**  
**SISTEMAS, UNAM**

**CIUDAD UNIVERSITARIA,, CIUDAD DE MÉXICO, SEPTIEMBRE, 2023**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**Coordinación de Estudios de Posgrado**  
**Ciencias de la Sostenibilidad**  
**Oficio: CGEP/PCS/170/2023**  
**Asunto: Asignación de Jurado**

**M. en C. Ivonne Ramírez Wence**  
**Directora General de Administración Escolar**  
**Universidad Nacional Autónoma de México**  
**Presente**

Me permito informar a usted, que el Comité Académico del Programa de Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, en su sesión 91 del 16 de mayo del presente año, aprobó el jurado para la presentación del examen para obtener el grado de **DOCTORA EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD**, de la alumna **Gómez Priego Paola** con número de cuenta **96533116**, con la tesis titulada "Avances teóricos y metodológicos en sistemas de conocimiento para la gobernanza de la complejidad socioambiental: evaluación del impacto ambiental ex ante y ex post", bajo la dirección del Dr. Luis Antonio Bojórquez Tapia.

PRESIDENTA: DRA. MARISOL ANGLÉS HERNÁNDEZ  
VOCAL: DR. XAVIER CHIAPPA CARRARA  
SECRETARIO: DR. JESÚS MARIO SIQUEIROS GARCÍA  
VOCAL: DR. MIGUEL EDUARDO EQUIHUA ZAMORA  
VOCAL: DR. CÉSAR AUGUSTO SALINAS ZAVALA

Sin más por el momento me permito enviarle un cordial saludo.

**ATENTAMENTE,**

**"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"**  
**Cd. Universitaria, Cd. Mx., 14 de agosto de 2023.**



**Dr. Alonso Aguilar Ibarra**  
**Coordinador**  
**Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, UNAM**

## **Agradecimientos**

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, al Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad de la UNAM, a CONAHCYT beca 2019-000002-01NACF-12768, al proyecto PAPIIT IV-110118 y al Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad (LANCIS) del Instituto de Ecología de la UNAM, en particular el apoyo de sus dos últimos directores, el Dr. César Augusto Domínguez Tejada y la Dra. Ana Elena Escalante Hernández.

Además, quiero extender mi más sincero agradecimiento a mi tutor, el Dr. Luis Antonio Bojórquez Tapia, por su fuente continua de propuestas, conceptos, teorías y métodos innovadores y retadores, por brindarme la libertad para explorar, debatir y cuestionar mis ideas y por proporcionarme un espacio seguro y propicio para mi desarrollo académico.

Quiero extender mi gratitud a los miembros de mi jurado de examen de grado, la Dra. Marisol Anglés Hernández, el Dr. Xavier Chiappa Carrara, el Dr. Miguel Eduardo Equihua Zamora, el Dr. César Augusto Salinas Zavala y en particular, al Dr. Jesús Mario Siqueiros García, quien fungió como miembro de mi comité tutor. Adicionalmente, no puedo dejar fuera al jurado de mi candidatura, la Dra. Leticia Bonifaz Alfonso, el Dr. Arturo Flores Martínez y la Dra. Marisa Mazari Hiriart. Sus aportaciones y apertura contribuyeron a mejorar este trabajo significativamente.

Asimismo, quiero extender mi más sincera gratitud a Candela Iglesias y Esteban Domínguez, cuya amistad fue determinante para concluir exitosamente este proyecto y quienes ofrecieron apoyo incondicional en los momentos más críticos. En el mismo tenor, no puedo dejar de agradecer a Nadia Ruíz, cuya amistad inigualable estuvo acompañada de su determinación como colaboradora en el LANCIS para superar todos los desafíos que surgieron durante el proceso de construcción del Observatorio de EIA.

Por último, quiero expresar un profundo agradecimiento a mis colegas y amigos Víctor Hernández, Ofelia García y Tatiana Merino, quienes fueron fundamentales en la formación de una comunidad de apoyo, compañerismo y solidaridad profesional del Área de Planeación Colaborativa del LANCIS.

Cada una de estas personas ha dejado una marca profunda en mi trayectoria académica, profesional y personal y me siento muy afortunada de sus contribuciones.

## **Resumen**

El objetivo de este trabajo es presentar un sistema de conocimiento para la gobernanza de la complejidad socioambiental para que la Evaluación del Impacto Ambiental (EIA) se convierta en una herramienta que fomente las transformaciones sostenibles. En esta tesis redefino a un impacto ambiental como una presunción refutable que establece el posible nexo entre las obras y actividades y el riesgo por daño o daño significativo. El sistema de conocimiento es un artefacto operativo para la generación y distribución eficiente de conocimiento útil y plural durante la conducción de procesos EIA ex ante y ex post. Conocimiento útil para las transformaciones sostenibles en el contexto de la EIA es aquel que permite la formación de acuerdos satisfactorios y suficientes durante la evaluación de riesgo de daño y daño significativo, sobre todo cuando los procesos de toma de decisiones están inmersos en conflictos y disputas ambientales asociados a la incertidumbre y complejidad inherente a los sistemas socioambientales. Los dos artículos incluidos en esta tesis ilustran cómo se aplica el sistema de conocimiento en casos reales de infraestructura gris. En el primer artículo propongo un procedimiento para determinar colaborativamente la significancia de impactos en EIA ex ante para proyectos inmersos en disputas ambientales. En el segundo artículo presento un método que determina el valor de la información proveniente del juicio de expertos en la EIA ex post para abordar la incertidumbre en proyectos en disputa y ofrecer elementos en procesos judiciales para determinar la carga de la prueba y responsabilidad por daños ambientales.

## **Abstract**

The objective of this thesis is to present a knowledge system for the governance of socio-environmental complexity, so that Environmental Impact Assessment (EIA) becomes a decision-making tool for sustainable transformations. In this work, I redefine that an environmental impact is a refutable presumption that establishes the plausible link between projects and environmental damage. This knowledge system is a framework to craft and distribute usable knowledge for *ex-ante* and *ex-post* EIA. Crafting usable knowledge for sustainable transformations in the context of EIA requires the development of satisfactory and sufficient agreements during the evaluation of the risk environmental damage. This knowledge is crucial when the decision-making processes are immersed in conflicts and environmental disputes associated with the uncertainty and complexity inherent of socio-environmental systems. The two articles included in this thesis illustrate how the knowledge system is applied to real case studies of grey infrastructure. In the first article, I propose an analytic deliberation approach for collaborative determination of impact significance of projects in dispute in *ex-ante* EIA. In the second article, I introduce an approach designed to navigate the inherent uncertainty surrounding expert judgment regarding environmental tort claims and the subsequent adjudication process, particularly in cases involving grey infrastructure projects.

## Índice

1. Introducción	1
2. Propuesta de sistema de conocimiento para la gobernanza de la complejidad socioambiental en la EIA <i>ex ante</i> y <i>ex post</i>	14
3. Artículo publicado: Analytic deliberation approach for collaborative determination of impact significance of projects in dispute, a case study in Mexico	28
4. Artículo en revisión: What is evidence of environmental damage? Navigating expert judgment uncertainty	40
5. Síntesis del Observatorio de Evaluación del Impacto Ambiental (EIA) en el tema de turismo costero en el periodo 2002-2016	70
6. Discusión	85
7. Conclusiones	112
8. Referencias	114

# 1. Introducción

## 1.1 Antecedentes teóricos y conceptuales

### Presentación

La investigación que aquí se presenta ofrece una propuesta sistema de conocimiento para la gobernanza de la complejidad socioambiental para la Evaluación del Impacto Ambiental (EIA) *ex ante* y *ex post*. Para introducir mi investigación, explicaré los orígenes de la EIA y los retos que enfrenta debido a la función para la que fue concebida, así como el marco teórico de las ciencias de la sostenibilidad para que funcione como un instrumento para las transformaciones sostenibles. En este contexto, me enfocaré en las definiciones de sistemas de conocimiento para la sostenibilidad, la gobernanza para la sostenibilidad y de los sistemas socioambientales y la planeación colaborativa. También sintetizaré la importancia que la EIA ha mantenido globalmente como instrumento para las llamadas transformaciones sostenibles en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En la parte última de esta sección de los antecedentes, haré una síntesis de los compromisos internacionales adquiridos por México para abordar el acceso a la información, la participación pública y el acceso a la justicia vía el Acuerdo de Escazú, y su relevancia con la gobernanza de la EIA.

En la sección 1.2 presento la hipótesis, las preguntas de investigación y los objetivos de mi trabajo. En la sección 2 sintetizo la propuesta de sistema de conocimiento para la gobernanza de la complejidad socioambiental. En la sección 3 incluyo el artículo publicado *Analytic deliberation approach for collaborative determination of impact significance of projects in dispute, a case study in Mexico* (Gómez-Priego & Bojórquez-Tapia, 2023) ofrezco un procedimiento para determinar colaborativamente la significancia de impactos en EIA *ex ante* para proyectos inmersos en disputas ambientales. En la sección 4, incluyo el artículo en revisión *What is evidence of environmental damage? Navigating expert judgment uncertainty* presento un método que determina el valor de la información proveniente del juicio de expertos en la EIA *ex post* para abordar la incertidumbre de proyectos en disputa y ofrecer elementos en procesos judiciales para determinar la carga de la prueba y responsabilidad por daños ambientales. En la sección 5, se desarrolla la discusión, donde me enfoco en contestar las preguntas de investigación y como fueron atendidas en los dos artículos de graduación y el Observatorio de EIA.



## **Evaluación del impacto ambiental (EIA)**

La EIA como herramienta de planeación se desarrolla desde las ciencias ambientales dentro del modelo racional de planeación. Del modelo racional de planeación se desprende la noción de que el uso de conocimiento y juicio de expertos (técnicos y científicos) es necesario, suficiente y administrativamente lo más eficiente para evaluar y resolver cualquier tipo de problema ambiental (Harper & Stein, 2006). Esta noción se basa en el paradigma tecnócrata, que establece a la EIA como un proceso meramente “técnico-científico” y como tal, sus deficiencias solo pueden ser mejoradas entre científicos (Formby, 1990). Aunque el modelo racional tradicional reconoce la necesidad de participación de otras partes interesadas, solo se propone de manera pasiva al final de los procesos administrativos. Esto es, solo busca legitimar decisiones mediante procesos de divulgación sin que las opiniones de terceros sean tomadas en cuenta (Cornwall, 2008).

Este modelo revela varias deficiencias importantes. En primer lugar, la EIA es un proceso técnico y administrativo difícilmente digerible para la sociedad, que resulta en reportes saturados de tecnicismos y términos legales (en algunos casos de manera deliberada para oscurecer resultados), por lo que el nivel de conocimiento técnico, científico, administrativo y legal necesario para participar es muy alto (Bojórquez-Tapia & García, 1998; Eckerd, 2017; Hartley & Wood, 2005; Ortolano & Shepherd, 1995; Simpson & Basta, 2018). En segundo lugar, los promotores de proyectos tienden a interactuar de forma adversarial con el público y partes interesadas durante el proceso de evaluación, en particular en proyectos de infraestructura gris (Wood et al., 2007). En tercer lugar, la evaluación de impacto ambiental se basa inevitablemente en juicio de expertos en el que su trabajo incluye desde identificar los alcances de la evaluación, la forma de medir y establecer la línea base, la evaluación de lo que constituye un impacto ambiental y por ende lo que se excluye de la evaluación, la determinación de la significancia de los impactos, la propuesta de medidas de prevención, mitigación o compensación de impactos, la evaluación de la eficacia de las medidas propuestas y la evaluación de alternativas y los efectos a largo plazo de éstas (Beattie, 1995; Kontic, 2000; Petts, 1999; Weston, 2004; Wilkins, 2003). En cuarto lugar, este proceso se lleva a cabo invariablemente bajo condiciones de alta incertidumbre, poca información disponible, recursos limitados (financieros, especialistas y tiempo) e inmerso en el potencial conflicto de interés puesto que el documento que resulta de la EIA es contratado por los promotores de los proyectos (Bojórquez-Tapia, 1989; Enríquez-de-Salamanca, 2018). En

quinto lugar, el modelo racional de planeación sustenta su efectividad en la construcción y comparación de alternativas viables durante el diseño de los proyectos. En la práctica, los proyectos tienden a ser diseñados de manera independiente y previa a la EIA y las alternativas tienden a ser ejercicios poco rigurosos, sistemáticos y transparentes para cumplir con los requisitos burocráticos dentro de un procedimiento administrativo (Lawrence, 2003b). Así, la EIA evolucionó históricamente para cumplir con dos funciones: (1) constituir un proceso administrativo de evaluación y autorización de proyectos públicos y privados de manera objetiva y comprensiva, a partir de bases técnicas y científicas tradicionales; e (2) informar a las partes interesadas sobre el proceso de evaluación de proyectos y las consecuencias al ambiente (Ortolano & Shepherd, 1995).

Sin embargo, los procesos que ocurren durante el diseño y evaluación de proyectos, así como la percepción de las partes interesadas forman parte de procesos sociopolíticos con estructuras de poder complejas, valores e intereses contrapuestos que frecuentemente resultan en conflictos y disputas ambientales (Balint et al., 2011; Bojórquez-Tapia et al., 1994; Crowfoot & Wondolleck, 2012). Cuando las resoluciones emitidas por autoridades ambientales en el proceso de EIA se contraponen a los intereses, conocimiento y perspectivas de otras partes interesadas es común que las decisiones resultantes sean percibidas con poca credibilidad, relevancia y legitimidad (Cash et al., 2002; Jasanoff, 2005) y que se exacerben los conflictos ambientales (Dietz et al., 1989).

Si bien en la literatura, se han documentado las deficiencias de la EIA por más de 30 años (Caldwell, 1988; Jay et al., 2007; Lawrence, 2003a; R. K. Morgan, 2012), a nivel mundial es el instrumento de toma de decisiones más institucionalizado en el mundo y por lo tanto incorporado como uno de los más importantes para el desarrollo sostenible y una de las salvaguardas incorporadas en proyectos financiados por las grandes agencias internacionales (UNEP, 1987, 1999, 2002, 2016, 2018).

En México, la EIA conforma uno de los instrumentos de política ambiental considerados en la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA, 1988) y desde su implementación se ha asumido como un proceso administrativo regido bajo el modelo racional de planeación sujeto a las deficiencias antes mencionadas.

Por este motivo, en este marco teórico retomo conceptos que paralelamente se han desarrollado para mejorar a la EIA para las transformaciones sostenibles. Refiriendo a (Kates et al., 2001) las ciencias de la sostenibilidad requieren de integrar teorías, conceptos, técnicas y datos de diversos cuerpos de conocimiento para comprender y abordar los retos de la sostenibilidad y atender con mayor eficiencia la brecha entre la ciencia y la toma de decisiones.

### **Sistemas de conocimiento para la sostenibilidad**

Una prioridad de las Ciencias de la Sostenibilidad es generar, integrar, sintetizar, comprender, aplicar y difundir conocimiento útil para el desarrollo sostenible. Este quehacer implica un proceso colaborativo que integre perspectivas múltiples para fomentar procesos de toma de decisiones más eficaces e incluyentes y, por lo tanto, abarque distintos ámbitos de conocimiento, desde el científico, el administrativo y legal, el económico, el social y el cultural (van Kerkhoff & Lebel, 2006).

De acuerdo con (Cash et al., 2003), este proceso requiere de la implementación de sistemas de conocimiento para la sostenibilidad. Estos se definen como los marcos, procesos y prácticas que facilitan la generación, el intercambio y la aplicación de conocimiento útil para abordar los retos del desarrollo sostenible. En general, los sistemas de conocimiento deben incluir el conocimiento de científicos, tecnócratas, responsables de la planeación, autoridades, representantes de la sociedad civil, representantes de comunidades vulnerables, e instituciones educativas. Con base en esta definición, el objetivo de los sistemas de conocimiento es facilitar la comunicación, traducción y mediación de conocimiento para incidir en las transformaciones sostenibles. Las tres características indispensables del conocimiento para la sostenibilidad son la relevancia, la credibilidad y la legitimidad. La relevancia o pertinencia consiste en demostrar que los productos de la investigación científica responden a las necesidades de conocimiento de los asuntos a resolver. La credibilidad se construye al emplear modelos, métodos, datos, e información válidos y fidedignos. La legitimidad dentro de estos sistemas de conocimiento corresponde al respeto sobre las visiones, creencias y valores de los actores sociales y tomadores de decisiones en la producción del conocimiento.

En este sentido, en el contexto de las ciencias de la sostenibilidad, los sistemas de conocimiento requieren (Folke, 2006; Garmendia & Stagl, 2010; van Kerkhoff & Lebel, 2006): (1) procesos innovadores para la generación de conocimiento útil; (2) la traducción, transferencia,

difusión y adopción del conocimiento; (3) la interacción continua con los usuarios del conocimiento para facilitar el aprendizaje y la adopción de las prácticas propuestas; (4) la integración de nueva información que retroalimente a los sistemas socioambientales a manera que se cree una capacidad adaptativa, (5) la incorporación rigurosa de la incertidumbre y complejidad de los sistemas socioambientales mediante procesos apoyados por desarrollos tecnológicos (5) el apoyo a instituciones flexibles en sistemas de gobernanza; y (5) el fomento al aprendizaje social al integrar formas de conocimiento plurales.

### **Gobernanza para la sostenibilidad y de los sistemas socioambientales**

La gobernanza para la sostenibilidad se refiere a los principios, procesos y prácticas utilizados por organizaciones e instituciones para la coordinación y colaboración en la gestión del desarrollo sostenible (Meadowcroft, 2007). Requiere la adopción mecanismos efectivos para la participación, involucramiento y rendición de cuentas, que en conjunto se denominan principios de “buena gobernanza” (Kemp et al., 2005). En cuanto a la rendición de cuentas, una buena gobernanza debe garantizar que los procesos de toma de decisiones sean inclusivos, equitativos y receptivos a las necesidades e intereses de las partes interesadas, por lo que se deben caracterizar por su transparencia, responsabilidad y estado de derecho. Estos procesos también deben promover el uso eficiente y efectivo de los recursos disponibles, la protección de los derechos humanos, la legitimidad y el fomento de la justicia ambiental (Adger et al., 2003; Bernstein & van der Ven, 2017; Meadowcroft, 2007). De lo anterior se desprende que la gobernanza de los sistemas socioambientales son los procesos y mecanismos a través de los cuales se toman decisiones, se implementan políticas y se llevan a cabo acciones para gestionar la conducción de un sistema socioambiental hacia la sostenibilidad. La gobernanza de los sistemas socioambientales implica (Kemp et al., 2005; Konefal, 2015; Loorbach, 2010; Meadowcroft, 2007; Voss et al., 2006): (1) la coordinación e integración de diversos actores, incluyendo instituciones gubernamentales, organizaciones no gubernamentales, instituciones de investigación y educativas, grupos comunitarios e individuos, para garantizar la gestión sostenible de los sistemas socioambientales, (2) la integración de distintas formas de conocimiento mediante un esquema que atienda explícitamente la complejidad e incertidumbre de los sistemas socioambientales, (3) el desarrollo, innovación e implementación de prácticas que fomenten las transformaciones sostenibles, (4) la disponibilidad y accesibilidad de información precisa,

oportuna y comprensible, (5) la generación de la información para la toma de decisiones debe llevarse a cabo con rigor y respaldarse en evidencias.

### **Transformaciones sostenibles y Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)**

Las transformaciones sostenibles son los cambios fundamentales que se tienen que instaurar en diversos niveles de gobernanza por medio de innovaciones teóricas, metodológicas y tecnológicas para cumplir con la Agenda 2030 (Bojórquez-Tapia et al., 2022).

Al respecto, la Agenda 2030 se compone de 17 ODS, que sirven para orientar las transformaciones sostenibles en cuestiones torales que enfrenta la humanidad en lo social, lo económico y lo ambiental (United Nations, 2015, 2018). Para satisfacer las necesidades de actuales y futuras de la sociedad, los portafolios de cursos de acción para el cumplimiento de los ODS requieren de grandes inversiones en “infraestructura gris” o “infraestructura dura”. La infraestructura gris se puede concebir como un conglomerado de obras tales como presas, sistemas de agua urbanos, agrícolas o industriales, redes de energía, extracción de recursos naturales, grandes desarrollos urbanos, etc. Para todas estas obras, la EIA es un requerimiento indispensable de las grandes instituciones financiadoras por considerarse el instrumento más institucionalizado a nivel mundial y uno de los de mayor relevancia para la Agenda 2030 (UNEP, 2018). Sin embargo, en países en transición como México, los ciudadanos y las organizaciones no gubernamentales están presentando un número creciente de demandas por daños en busca de justicia ambiental por las grandes inversiones en infraestructura gris. Algunos casos emblemáticos implican un alto grado de incertidumbre científica, por lo que han sido resueltos por la Suprema Corte de Justicia de la Nación utilizando los principios *in dubio pro natura* (en caso de duda, la naturaleza), *in dubio pro aqua* (en caso de duda, el agua) y *propter rem* (función ecológica de la propiedad). En este contexto, los tribunales suelen solicitar peritajes ambientales posteriores a la EIA (*ex post*) para determinar las evidencias disponibles de daños ambientales potencialmente causados por una conducta ilícita. La EIA *ex post* requiere un enfoque retrospectivo primordialmente basado en juicio de expertos. En la sección 4 de esta tesis, incluyo una propuesta metodológica para lidiar con la incertidumbre y determinar el valor de la información provista por juicio de expertos en un caso EIA *ex post*.

## **Planeación colaborativa**

Como contrapropuesta del esquema racional de planeación surge la planeación colaborativa. La planeación colaborativa provee objetivos útiles para la construcción de un sistema de conocimiento para la sostenibilidad en materia de la evaluación del impacto ambiental. Estos objetivos incluyen (Innes & Booher, 1999, 2010; Rydin, 2007; Sutherland et al., 2012): (1) el objetivo último es la búsqueda de acuerdos; (2) la planeación debe lidiar con formas múltiples de conocimiento, por lo que debe involucrar y dar voz todos los representantes de las partes interesadas, (3) la búsqueda de acuerdos se logra mediante la negociación y mediación de los intereses, pero sólo se obtiene después de haber explorado y atendido adecuadamente las diferencias que resultan en conflictos o disputas; (4) el proceso de planeación genera conocimiento que se construye colectivamente entre las partes interesadas, por lo tanto hay aprendizaje social, (5) el objetivo no es el consenso a toda cosa, sino la creación de espacios ideales de deliberación que garanticen que grupos en posiciones de desventaja tengan voz, (6) la toma de decisiones debe abordar la complejidad de los sistemas socioambientales por lo tanto debe llevarse a cabo bajo altas condiciones de incertidumbre. (7) la toma de decisiones debe ser racional e incorporar mecanismos para identificar la mejor información y evidencias disponibles, (8) la información usada para la toma de decisiones debe ser creíble, relevante y legítima.

## **Principios de derecho internacional para el desarrollo sostenible**

Los principios fundamentales del derecho internacional para avanzar hacia el desarrollo sostenible se basan en diversas fuentes del derecho internacional, como tratados, convenciones y declaraciones. A continuación, se presentan los principios fundamentales y algunas de las fuentes más importantes:

1. Principio de igualdad y no discriminación: Este principio se consagró en la Declaración Universal de Derechos Humanos (Naciones Unidas, 1948), el Pacto Internacional de Derechos Civiles y Políticos (Naciones Unidas, 1966a) y el Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales (Naciones Unidas, 1966b) y se refiere a se refiere al trato justo e igualitario y la eliminación de barreras y obstáculos que impidan el pleno disfrute de todas las personas, sin importar su raza, etnia, género, religión, orientación sexual, discapacidad u otras características personales o sociales.

2. Principio de transparencia y rendición de cuentas: Este principio está respaldado por el principio 10 de la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (United Nations, 1992) y el Acuerdo de Escazú (DOF, 2021), entre otros instrumentos internacionales. El principio de transparencia y rendición de cuentas es un concepto fundamental en la gobernanza institucional. Se refiere a la obligación de las autoridades, instituciones y organizaciones de informar de manera clara, accesible y oportuna sobre sus acciones, decisiones y el uso de los recursos. La transparencia implica la apertura y divulgación de información relevante y pertinente para que las personas puedan conocer y comprender cómo se toman las decisiones, cómo se utilizan los recursos y cuáles son los resultados obtenidos. La rendición de cuentas, por su parte, se refiere a la obligación de las autoridades y organizaciones de justificar y asumir la responsabilidad de sus decisiones y los resultados de éstas.

3. Principio de buena fe: Este principio se consagró en la Convención de Viena sobre el Derecho de los Tratados (Naciones Unidas, 1969) y se aplica en el contexto de las relaciones internacionales y la cooperación para el desarrollo sostenible. El principio de buena fe establece que los Estados que celebran un tratado deben hacerlo de manera honesta y sincera, respetando los compromisos asumidos y actuando de buena fe en todas las etapas de la vida del tratado. Esto significa que los Estados deben cumplir con sus obligaciones y no deben tomar medidas o acciones que vayan en contra de su espíritu y propósito.

4. Principio preventivo o principio de prevención: Este principio se basa en el Principio 15 de la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (United Nations, 1992) y se ha reafirmado en otros tratados y acuerdos internacionales, como el Protocolo de Kyoto (Naciones Unidas, 1998). Este principio establece la necesidad de tomar medidas proactivas para prevenir daños ambientales o para la salud humana antes de que ocurran, enfocándose en la anticipación y la acción temprana.

5. Principio precautorio: Este principio se encuentra consagrado en el Principio 15 de la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (United Nations, 1992) y se aplica en diversos instrumentos internacionales relacionados con la protección del medio ambiente. El principio precautorio establece que, cuando exista una amenaza de daño grave o irreversible al medio ambiente, la falta de certeza científica absoluta no debe ser utilizada como excusa para postergar la adopción de medidas para prevenir o mitigar dicho daño.

6. Principio de equidad intergeneracional: Este principio se deriva del reconocimiento de los derechos de las generaciones futuras y se refleja en la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (United Nations, 1992) y otros documentos relacionados con el desarrollo sostenible. Este principio reconoce que el desarrollo y la utilización de los recursos naturales no deben comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades y disfrutar de un entorno saludable y sostenible. Se trata de asegurar que las decisiones y políticas actuales no agoten los recursos ni causen daños irreversibles al medio ambiente, poniendo en peligro el bienestar de las generaciones futuras.

7. Principio de máxima publicidad: Este principio se encuentra respaldado en el acceso a la información ambiental, consagrado en el Principio 10 de la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (United Nations, 1992), así como en la Convención de Aarhus sobre el Acceso a la Información, la Participación del Público en la Toma de Decisiones y el Acceso a la Justicia en Asuntos Ambientales (UNECE, 1998). Este principio establece que la información relacionada con los asuntos públicos y el ejercicio del poder debe ser accesible y divulgada de manera amplia y transparente a la ciudadanía. Si bien el principio de máxima publicidad promueve la divulgación amplia de la información, puede haber límites legales en casos excepcionales, como la protección de datos personales o la asociada a la seguridad nacional.

8. Principio *pro persona*: Este principio se deriva de los derechos humanos y se encuentra reconocido en diversos instrumentos internacionales, como la Declaración Universal de Derechos Humanos (Naciones Unidas, 1948) y otros tratados y convenciones que protegen los derechos de grupos vulnerables. El principio *pro persona*, también conocido como principio *pro homine* establece que la interpretación y aplicación de las normas jurídicas debe favorecer y proteger de manera prioritaria la dignidad de las personas. Esto significa que, en caso de conflicto entre diferentes normas o interpretaciones, se debe priorizar la opción que brinde una mayor protección a los derechos humanos de las personas involucradas.

### **Acuerdo de Escazú**

El Acuerdo de Escazú o "Acuerdo Regional sobre el Acceso a la Información, la Participación Pública y el Acceso a la Justicia en Asuntos Ambientales en América Latina y el Caribe" es un tratado internacional vinculante que busca garantizar el acceso a la información, la



participación pública y la justicia en asuntos ambientales en América Latina y el Caribe. En México entró en vigor el pasado 22 de abril del 2021(DOF, 2021).

El Acuerdo de Escazú es considerado un instrumento crucial para fortalecer la gobernanza institucional, fomentar la transparencia, la participación ciudadana, la protección de los defensores de derechos humanos en asuntos ambientales y el fortalecimiento de la cooperación y de capacidades institucionales. El Acuerdo de Escazú se basa en compromisos internacionales previos relacionados con el acceso a la información, la participación pública y la justicia en asuntos ambientales con provisiones especiales para los pueblos indígenas. Algunos de los antecedentes más importantes incluyen:

Declaración de Río sobre Medio Ambiente y Desarrollo: Adoptada en la Cumbre de la Tierra de 1992, estableció el principio 10, que reconoce el derecho de acceso a la información, la participación pública y la justicia en asuntos ambientales (United Nations, 1992).

La afirmación de la Corte Internacional de Justicia de que la protección del medio ambiente constituye un *sine qua non* y dado que el daño al medio ambiente *puede perjudicar y debilitar todos los derechos establecidos en la Declaración Universal de Derechos Humanos* (Naciones Unidas, 1948).

Convenio de Aarhus: Firmado en 1998 y conocido oficialmente como el “Convenio sobre el Acceso a la Información, la Participación del Público en la Toma de Decisiones y el Acceso a la Justicia en Asuntos Ambientales”, estableció estándares y obligaciones para el acceso a la información, la participación pública y el acceso a la justicia. Al año 2012, 47 países de Europa ratificaron su compromiso incluida la Unión Europea (UNECE, 1998).

Declaración de Río+20: Emitida en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible en 2012, reafirmó la importancia del acceso a la información y la participación pública en asuntos ambientales, y llamó a los países a considerar la adopción de un instrumento regional en América Latina y el Caribe (United Nations, 2012).

Los esfuerzos en el derecho internacional mencionados por (Anglés Hernández, 2021) que resultaron en la modificación del Artículo 4º de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que afirma que *Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El Estado garantizará el respeto a este derecho. El daño y deterioro*

*ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley (CPEUM, 1917).*

Las negociaciones para el Acuerdo de Escazú fueron promovidas por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) inicialmente con las Directrices de Bali en el 2015 para "Poner en práctica el Principio 10 de Río" (PNUMA, 2015).

De este modo, el Acuerdo de Escazú establece derechos y obligaciones para los Estados estableciendo como el objetivo principal en el Artículo 1: *Garantizar la implementación plena y efectiva en América Latina y el Caribe de los derechos de acceso a la información ambiental, participación pública en los procesos de toma de decisiones ambientales y acceso a la justicia en asuntos ambientales, así como la creación y el fortalecimiento de las capacidades y la cooperación, contribuyendo a la protección del derecho de cada persona, de las generaciones presentes y futuras, a vivir en un medio ambiente sano y al desarrollo sostenible.* En particular, define los términos de “daño” y “daño significativo” como:

- *el riesgo real de la divulgación de información, que se demuestra e identifica como un perjuicio significativo al interés público o a la seguridad nacional;*
- *la pérdida, cambio, deterioro, menoscabo, afectación o modificación adversos y medibles de los hábitat, de los ecosistemas, de los elementos y recursos naturales, de sus condiciones químicas, físicas o biológicas, de las relaciones de interacción que se dan entre éstos, así como de los servicios ambientales que proporcionan;*
- *el que ocurre sobre algún elemento ambiental a consecuencia de un impacto ambiental adverso; el que resulta de uno o más impactos ambientales sobre uno o varios elementos ambientales o procesos del ecosistema que desencadenan un desequilibrio ecológico, así como el que propicia la pérdida de uno o varios elementos ambientales que afecta la estructura o función o que modifica las tendencias evolutivas o sucesionales del ecosistema.*

En la Sección 2 se profundiza lo más relevante de este acuerdo para mi investigación.

## 1.2 Hipótesis, preguntas de investigación y objetivos

### Hipótesis

H1: Un sistema de conocimiento para la gobernanza de la complejidad socioambiental incrementa la utilidad de la EIA como instrumento para impulsar transformaciones sostenibles.

H0: Un sistema de conocimiento para la gobernanza de la complejidad socioambiental no incrementa la utilidad de la EIA como instrumento para impulsar transformaciones sostenibles.

### Preguntas de investigación

*¿Cómo un sistema de conocimiento para la gobernanza de la complejidad socioambiental propicia la generación de conocimiento útil para las transformaciones sostenibles en el contexto de la EIA?*

De la pregunta anterior se derivan las siguientes preguntas para responder la hipótesis.

*¿Qué constituye conocimiento útil para las transformaciones sostenibles en el contexto de la EIA?*

*¿Qué constituye esencialmente un impacto ambiental?*

*¿Qué componentes criterios y atributos debería tener un sistema de conocimiento para la sostenibilidad para la gobernanza de la complejidad socioambiental en el contexto de la EIA?*

*¿Por qué es necesario enmarcar el Acuerdo de Escazú en el sistema de conocimiento para la gobernanza de la complejidad socioambiental en el contexto de la EIA?*

*¿Qué características mínimas debería incluir la EIA para tener credibilidad en el sistema de conocimiento para la gobernanza de la complejidad socioambiental?*

*¿Qué características mínimas debería incluir la EIA para ser relevante en el sistema de conocimiento para la gobernanza de la complejidad socioambiental?*

*¿Qué características mínimas debería incluir la EIA para aumentar el empoderamiento de las partes interesadas en el sistema de conocimiento para la gobernanza de la complejidad socioambiental?*

*¿Qué características mínimas deberían incluir los métodos de análisis para que la EIA sea eficaz y efectiva en el sistema de conocimiento para la gobernanza de la complejidad socioambiental?*

### **Objetivos**

1. Estructurar el marco conceptual de sistemas de conocimiento para la sostenibilidad, la complejidad de los sistemas socioambientales la gobernanza de los sistemas socioambientales y del Acuerdo de Escazú para la EIA.

De este objetivo, se desprenden los siguientes objetivos particulares:

- a. Con base en una revisión crítica de la literatura, identificar los conceptos teóricos que harían más efectiva a la EIA para la gobernanza de la complejidad socioambiental.
  - b. Identificar los avances de la gobernanza institucional de México en relación con el Acuerdo de Escazú.
  - c. Desarrollar la estructura de los componentes, criterios y atributos como sistema de conocimiento para la sostenibilidad para la gobernanza de la complejidad socioambiental en el contexto de la EIA (Sección 2).
2. Desarrollar innovaciones metodológicas y tecnológicas de los componentes teórico-metodológico y procesal-tecnológico del sistema de conocimiento.

De este objetivo, se desprenden los siguientes objetivos particulares:

- a. Desarrollar el proceso de deliberación analítica en la EIA *ex ante* con el fin de abordar la incertidumbre inherente al juicio de expertos e incorporar las perspectivas de las partes interesadas para la determinación colaborativa de la significancia de impactos ambientales (Sección 3).
  - b. Desarrollar el proceso para evaluar las evidencias de juicios de expertos en casos de daño significativo en la EIA *ex post* mediante técnicas basadas en análisis Bayesiano y de valor de la información, y demostrar la aplicación del razonamiento abductivo y el análisis contrafactual (Sección 4).
3. Esbozar los elementos de un Observatorio de EIA usando como base el tema desarrollo turístico costero para identificar algunas barreras actuales para el cumplimiento del Acuerdo de Escazú (Sección 5).

De este objetivo, se desprenden los siguientes objetivos particulares:

- a. Compilar el repositorio de manifestaciones de impacto ambiental de proyectos de desarrollo turístico costero en México y toda la información publicada abiertamente sobre el cumplimiento procesal.
- b. Extraer información de las EIA turísticas costeras y compilar bancos de datos con indicadores de cumplimiento procesal enfatizando el acceso a la información y de participación.
- c. Sintetizar los principales resultados de los indicadores de cumplimiento procesal e identificar las barreras principales que enfrenta actualmente la EIA.

## **2. Propuesta de sistema de conocimiento para la gobernanza de la complejidad socioambiental en la EIA *ex ante* y *ex post***

De las preguntas de investigación anteriores se propone la siguiente definición basada en la revisión crítica de la literatura: *“los sistemas de conocimiento para la gobernanza de la complejidad socioambiental es el marco o esquema que facilita la generación y distribución eficiente de conocimiento útil y plural durante la conducción de procesos EIA ex ante y ex post. En esencia, estos sistemas son artefactos operativos para guiar a la EIA como uno de los instrumentos cruciales para propiciar las transformaciones sostenibles de los sistemas socioambientales”*. De esta definición, se derivan tres componentes que todo sistema de conocimiento debe incluir como mínimo: gobernanza institucional, teórico-metodológico y procesal-tecnológico (Ver Figura 1).

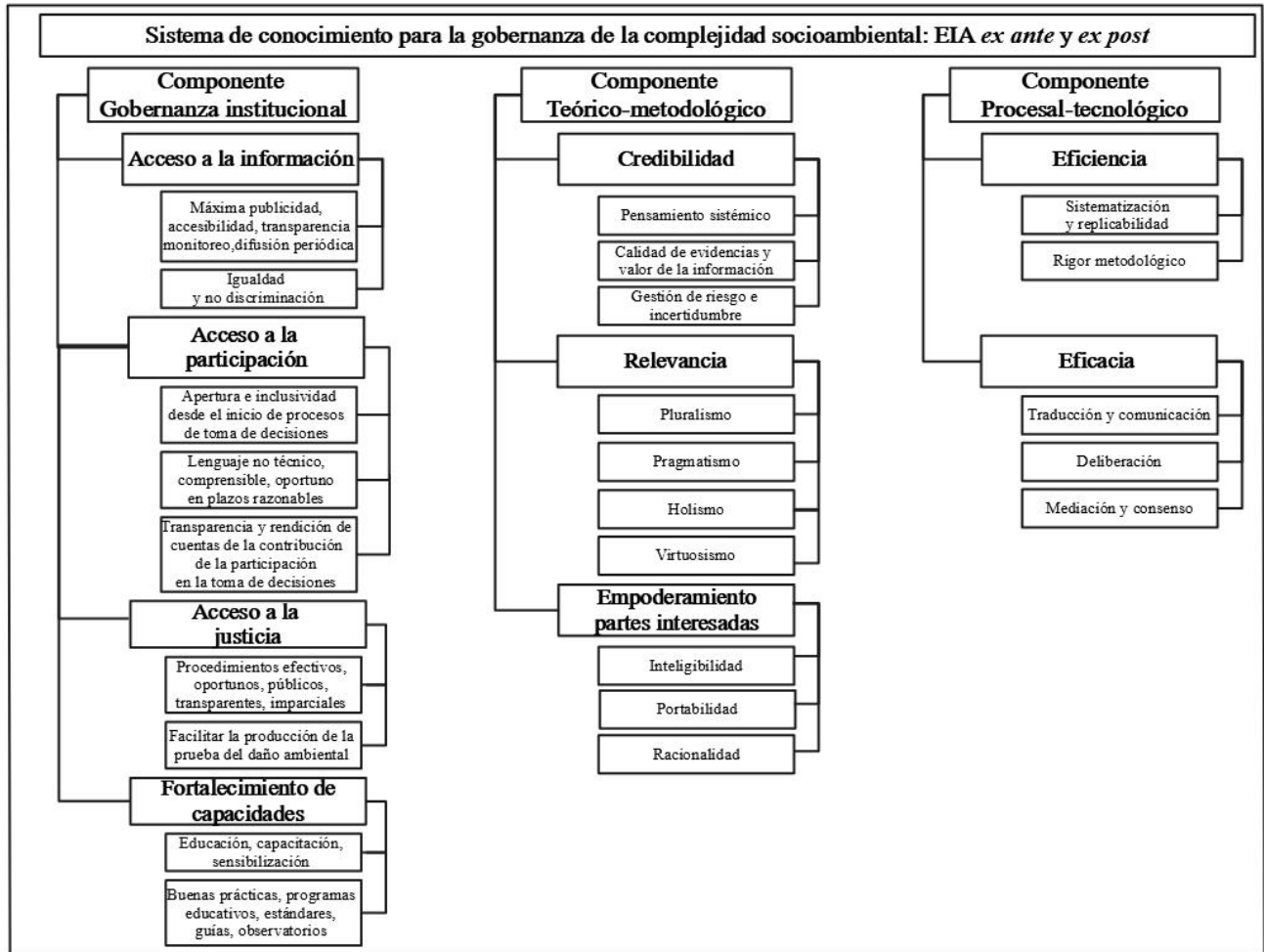


Figura 1. Estructura del sistema de conocimiento para la gobernanza de la complejidad socioambiental: EIA *ex ante* y *ex post*.

## 2.1 Componente de gobernanza institucional

El componente de gobernanza institucional se enmarca con el Acuerdo de Escazú porque es el primer acuerdo internacional vinculante ratificado en México que acopla explícitamente los derechos humanos con asuntos ambientales, fortaleciendo al contexto institucional para cumplir con el derecho constitucional a un medio ambiente sano (DOF, 2021). Los criterios del componente de gobernanza institucional se construyeron con base el Acuerdo de Escazú, y se resumen a continuación:

### **Acceso a la información**

Establece el derecho de las personas a acceder a la información ambiental que poseen las autoridades, lo cual incluye información sobre proyectos, políticas y decisiones que puedan afectar al medio ambiente bajo el principio de máxima publicidad. En relación con la EIA, el Artículo 7; Párrafo 17 establece que *“Se hará pública al menos la siguiente información: la descripción del área de influencia y de las características físicas y técnicas del proyecto o actividad propuesta; la descripción de los impactos ambientales del proyecto o actividad y, según corresponda, el impacto ambiental acumulativo; la descripción de las medidas previstas con relación a dichos impactos; ... de forma resumida... en lenguaje no técnico, comprensible; los informes y dictámenes públicos de los organismos involucrados dirigidos a la autoridad pública vinculados al proyecto o actividad de que se trate; la descripción de las tecnologías disponibles para ser utilizadas y de los lugares alternativos para realizar el proyecto o actividad sujeto a las evaluaciones, cuando la información esté disponible; y las acciones de monitoreo de la implementación y de los resultados de las medidas del estudio de impacto ambiental.*

### **Participación pública**

Reconoce el derecho de las personas a participar en la toma de decisiones sobre asuntos ambientales, lo que implica la posibilidad de expresar opiniones, presentar propuestas y participar en consultas públicas fomentando el acceso y la participación en igualdad de condiciones. Una contribución fundamental de este acuerdo se incluye en el Artículo 7 en que los estados se comprometen a: (1) implementar una participación abierta e inclusiva, (2) adoptar medidas para asegurar que la participación del público sea posible desde etapas iniciales del proceso de toma de decisiones, (3) considerar e incluir debidamente las observaciones del público para contribuyan en los procesos de toma de decisiones, (4) fundamentar la forma como se tomaron en cuenta las observaciones del público, (5) divulgar la información necesaria para hacer efectivo el derecho a participar e (5) incluir plazos razonables en la que el público sea informado de forma efectiva, comprensible y oportuna y a través de medios apropiados que incluya lenguaje no técnico.

### **Acceso a la justicia**

Reconoce la obligación de garantizar el acceso efectivo a la justicia en asuntos ambientales, incluyendo el derecho de las personas a interponer recursos legales y solicitar

medidas cautelares para proteger el medio ambiente. Para mi trabajo de investigación, merece hacerse mención el Art. 8, Párrafo 3. *Para garantizar el derecho de acceso a la justicia en asuntos ambientales, ... la posibilidad de disponer medidas cautelares y provisionales para, entre otros fines, prevenir, hacer cesar, mitigar o recomponer daños al medio ambiente; medidas para facilitar la producción de la prueba del daño ambiental, cuando corresponda y sea aplicable, como la inversión de la carga de la prueba y la carga dinámica de la prueba;*

### **Provisiones para los pueblos indígenas incluyen:**

**Protección de los derechos territoriales:** El acuerdo reconoce y promueve el respeto a los derechos territoriales de pueblos indígenas. Esto implica garantizar su participación en la toma de decisiones relacionadas con proyectos o actividades que puedan afectar sus tierras y recursos naturales, así como el acceso a la justicia en caso de violaciones de sus derechos.

**Acceso a la información ambiental:** El acuerdo asegura el derecho de los pueblos indígenas a acceder a información relevante sobre proyectos, políticas y decisiones que puedan tener impactos ambientales en sus territorios. Esto les permite estar informados y tomar decisiones informadas sobre asuntos que afectan su bienestar y su relación con el medio ambiente.

**Participación efectiva:** El acuerdo promueve la participación pública efectiva, incluida la participación de los pueblos indígenas, en la toma de decisiones relacionadas con el medio ambiente. Esto implica que los pueblos indígenas tengan la oportunidad de expresar sus puntos de vista, presentar propuestas y contribuir activamente en la planificación y ejecución de proyectos que puedan afectarles.

**Protección de defensores ambientales:** El acuerdo busca proteger a los defensores de derechos humanos en asuntos ambientales, incluidos los líderes indígenas que defienden sus territorios y recursos naturales. Proporciona medidas de protección y garantías para prevenir y abordar la violencia, las amenazas y las represalias contra los defensores.

**Acceso a la justicia:** El acuerdo asegura el acceso a la justicia para los pueblos indígenas en casos de violaciones de sus derechos ambientales. Esto implica el derecho a presentar recursos legales y solicitar medidas cautelares para proteger sus territorios y recursos naturales, así como recibir una respuesta efectiva y justa por parte de los sistemas de justicia.



## **Fortalecimiento de capacidades y cooperación**

En términos de fortalecimiento de capacidades, establece la obligación de desarrollar y fortalecer programas de sensibilización y creación de capacidades en derecho ambiental y derechos de acceso para el público, funcionarios judiciales y administrativos, instituciones nacionales de derechos humanos y juristas, entre otros y reconocer la importancia de las asociaciones, organizaciones o grupos que contribuyan a formar o sensibilizar al público en derechos de acceso; y fortalecer las capacidades para recopilar, mantener y evaluar información ambiental. En términos de cooperación establece que las partes promoverán el establecimiento de alianzas con otras organizaciones, incluidas las académicas y privadas para promover la cooperación regional y que se promoverán las actividades y mecanismos tales como: (a) diálogos, talleres, intercambio de expertos, asistencia técnica, educación y observatorios; (b) desarrollo, intercambio e implementación de materiales y programas educativos, formativos y de sensibilización; (c) intercambio de experiencias sobre códigos voluntarios de conducta, guías, buenas prácticas y estándares; y (d) comités, consejos y plataformas de actores multisectoriales para abordar prioridades y actividades de cooperación.

### **2.2 Componente teórico-metodológico**

El componente teórico- metodológico integra los preceptos de las CS necesarios para la mejora de la EIA.

#### **Credibilidad**

La **credibilidad** corresponde a la confianza percibida por las partes interesadas durante la generación y uso del conocimiento (Cash et al., 2002, 2003). Lo anterior presupone que la información cumple con un estándar mínimo de veracidad y competencia. Por lo tanto, la credibilidad consiste en emplear la mejor ciencia: modelos, métodos, datos, e información válidos y fidedignos. Para garantizar rigor en la generación de conocimiento, se requieren como mínimo tres atributos: pensamiento sistémico, calidad de las evidencias y valor de la información y gestión de riesgo e incertidumbre.

#### **•Pensamiento sistémico:**

Se refiere al enfoque en las ciencias de la sostenibilidad para abordar con la complejidad de los sistemas socioambientales (Seiffert & Loch, 2005). Los sistemas socioambientales,

también estudiados bajo el nombre de sistemas socio ecológicos, se refieren al conjunto de elementos complejamente interconectados entre la sociedad y sus entornos y la forma como se retroalimentan e influyen mutuamente (Liu et al., 2007; Ostrom, 2009; Turner et al., 2003). El enfoque de los sistemas socioambientales se basa en la noción de que las fronteras entre los componentes sociales e institucionales y los componentes biofísicos de los ecosistemas es arbitraria y es el resultado de los enfoques disciplinarios y las capacidades de los especialistas (Spangenberg, 2011), por lo tanto, para abordar su complejidad, sus componentes y dinámicas no pueden ser estudiados aisladamente (García, 2006; Mitchell, 2009). La literatura en ciencias de la sostenibilidad resalta que es necesario abordar los problemas la sostenibilidad integrando métodos y esquemas interdisciplinarios que incorporen la incertidumbre asociada a la complejidad de las interacciones dinámicas entre los factores sociales y ambientales (Innes & Booher, 2010; Liu et al., 2007).

Asimismo, retomando el trabajo de (Gallopín et al., 2001) aunque el pensamiento sistémico ayuda a incorporar las interdependencias entre los distintos componentes de los sistemas socioambientales, no es necesario crear un modelo que incluya absolutamente todas las interacciones entre todas las disciplinas para generar conocimiento útil. Esto es, el pensamiento sistémico sigue siendo válido si se incorporan únicamente los componentes necesarios para explicar un fenómeno.

•**Calidad de las evidencias y valor de la información:**

Calidad de las evidencias, conocido en inglés como *Weight of Evidence* (WoE) se refiere a las teorías y métodos para generar, sintetizar e interpretar evidencias (Weed, 2005) asegurando que se incorpora la complejidad de manera coherente en evaluaciones de riesgo ambiental (Suter & Cormier, 2011). Dentro de estas evaluaciones de caracterización de riesgo se incluye a la EIA. Una de las características reconocidas en la literatura para sintetizar e interpretar evidencias reside en los sistemas de evaluación y clasificación usados (Linkov et al., 2009). En este sentido, los métodos bayesianos y lógica difusa son útiles para la síntesis e interpretación de evidencias (Aitken & Stoney, 1991). Por su parte, el valor de la información se refiere a la probabilidad de que una conjetura sea más creíble que otra, considerando sus incertidumbres (Howard, 1966; Sheridan, 1995). El valor de la información sirve para contrastar hipótesis alternativas (Mock, 1971). De pragmatismo epistemológico, se retoma el concepto de razonamiento abductivo y la

inferencia contrafactual. El razonamiento abductivo se refiere al proceso de inferencia para encontrar la mejor explicación a un fenómeno (Behfar & Okhuysen, 2018; Bromley, 2008). La inferencia contrafactual se refiere al análisis de causalidad basado en la proposición que, si la causa C no hubiera ocurrido entonces el efecto E tampoco hubiera ocurrido (Lewis, 1973, 2000; Menzies, 2017). Por lo tanto, estos conceptos son fundamentales para poner a prueba hipótesis sobre impactos ambientales bajo un contexto de incertidumbre profunda (ver gestión de riesgo e incertidumbre).

**•Gestión de riesgo e incertidumbre:**

La gestión de riesgo refiere a la incorporación de métodos, planes, acciones para reducir la posibilidad o magnitud de la incertidumbre. La EIA ha evolucionado teóricamente de manera paralela desde el campo de gestión de riesgo y otras disciplinas como los estudios de ciencia y tecnología. Por ello, merece incluirse un término fundamental para este trabajo, la deliberación analítica. Este término fue acuñado por el Consejo Nacional de Investigación de la Academia Nacional de las Ciencias de Estados Unidos para incorporar la participación de la sociedad durante la determinación de riesgo para la salud, seguridad y calidad ambiental (National Research Council, 1996). La deliberación analítica es el proceso mediante el cual se adquiere e intercambia conocimiento (no solo el obtenido por técnicos y científicos) para entender las preocupaciones socioambientales más relevantes durante un proceso de toma de decisiones y llegar a acuerdos entre las partes interesadas (Akamani et al., 2016; Dietz & Stern, 1998; Gunderson, 2018). El componente analítico se logra aplicando sistemáticamente las mejores teorías y métodos científicos (aún los obtenidos mediante juicio de experto) para entender la complejidad de los sistemas socioambientales en torno a la caracterización del riesgo ambiental de una decisión (en la literatura de EIA, riesgo ambiental es un término intercambiable con impacto ambiental y no debe interpretarse con la noción de riesgo ambiental al que hace referencia la LGEEPA). El componente deliberativo se logra con el debate y discusión de todas las partes interesadas sobre los conflictos asociados a los juicios y valores inevitables que ofrecen las distintas percepciones y formas de asimilar el riesgo y la justificación de la manera de cómo fueron abordados en el componente analítico. En el contexto de la EIA, la deliberación analítica consiste en una discusión estructurada entre científicos, técnicos, autoridades y todas las partes interesadas para lograr una mejor comprensión de las distintas formas de asimilar los impactos ambientales y sus implicaciones sobre los efectos de un proyecto (Petts, 2003). En la sección 3 de

esta tesis, incluyo una propuesta de implementación de la deliberación analítica dentro de la determinación de la significancia de impactos en un proceso de EIA *ex ante*.

Por otra parte, las diversas formas de incertidumbre desempeñan un papel decisivo en la toma de decisiones y son especialmente relevantes en los procesos de decisión que abordan el impacto transformador sobre todo de las inversiones en infraestructura de gran escala (Bojórquez-Tapia et al., 2022). Por tanto, una caracterización de riesgo efectiva debe reconocer y lidiar con las distintas fuentes de incertidumbre que se describen a continuación.

<b>Tipo de incertidumbre</b>	<b>Definición</b>
Epistémica	Se refiere la imperfección de conocimiento de un sistema como resultado de errores de medición, errores sistemáticos, variación natural y de la aleatoriedad inherente (Regan et al., 2008). Esta incertidumbre puede entonces resultar en interpretaciones distintas acerca del mismo cuerpo de conocimiento (Bojórquez-Tapia et al., 2022).
Lingüística	Se refiere a las limitaciones que resultan del uso del lenguaje para traducir y comunicar conocimiento. Puede resultar de la falta de: vocabulario adecuado, especificidad, contexto, indeterminación teórica, ambigüedad y arbitrariedad en la forma de representar y clasificar los resultados de un análisis (Carey & Burgman, 2008; Regan et al., 2008).
Ontológica	Se refiere a la ignorancia de las entidades y relaciones del mundo real. Se manifiesta en los supuestos desconocidos en las representaciones científicas de los sistemas socioambientales y constituye un obstáculo importante para la formulación de propuestas sobre el futuro del mundo (Bojórquez-Tapia et al., 2022).
Normativa	Se refiere a la imposibilidad de conocer la evolución de los valores éticos que existirán en el futuro con respecto a las alternativas de decisión tomadas en el presente (MacAskill, 2014)

<b>Tipo de incertidumbre</b>	<b>Definición</b>
Inducida políticamente	Se refiere a la "ignorancia deliberada" de partes interesadas y representantes de instituciones al hacer frente a circunstancias controversiales y en disputa, limitando intencionadamente el alcance de las evaluaciones necesarias (Balint et al., 2011; McGoey, 2007).
Profunda	Se refiere al desacuerdo y controversia sobre la estructura y la composición y parámetros usados en la modelación de sistemas complejos (Balint et al., 2011; Walker et al., 2003).
Knightiana	Se refiere a la imposibilidad de conocer la información necesaria para abordarse mediante la modelación con el fin de predecir con exactitud resultados posibles. Se refiere a circunstancias inmersas en ignorancia, imprevisibilidad y propiedades sistémicas emergentes complejas (Knight, 2013).
Ambigüedad	Se refiere a la presencia de esquemas de conocimiento múltiples que resultan en interpretaciones distintas acerca del mismo fenómeno (Bojórquez-Tapia et al., 2022).

## **Relevancia**

La **relevancia o pertinencia** consiste en demostrar que los productos de la investigación científica responden a las necesidades particulares de conocimiento de los asuntos a resolver (Cash et al., 2002, 2003). Se consideraron cuatro atributos provenientes de la epistemología pertinentes para las ciencias de la sostenibilidad y que incluyen: pluralismo, pragmatismo, holismo y virtuosismo.

### **•Pluralismo:**

El pluralismo epistemológico en la toma de decisiones se refiere al reconocimiento y aceptación de múltiples formas de conocer y comprender el mundo (Blackburn, 2005; Jerneck & Olsson, 2020; Lawrence, 2003b). Este enfoque resalta la importancia de considerar y respetar diversos puntos de vista, experiencias y valores para tomar decisiones informadas y completas. El pluralismo epistemológico reconoce que el conocimiento no se limita a hechos objetivos y

científicos, sino que también incluye experiencias subjetivas, valores y emociones y que individuos y comunidades pueden tener formas únicas de entender e interpretar el mundo basadas en sus antecedentes culturales, sociales y personales. Al adoptar el pluralismo epistemológico, los responsables de la toma de decisiones pueden adquirir una comprensión más completa de cuestiones complejas y generar confianza en el proceso (Isaeva et al., 2015). Cabe mencionar, que, aunque el respeto a las distintas percepciones es crucial durante los procesos de toma de decisiones, no todas las percepciones y puntos de vista son igualmente válidos para usarse en la toma de decisiones (Gallopín et al., 2001). Por lo tanto, el pluralismo debe estar condicionado a rechazar el relativismo ingenuo que impida la formación de acuerdos (Innes & Booher, 2010; Mitchell, 1995).

**•Pragmatismo:**

El pragmatismo epistemológico está estrechamente relacionado con la tradición filosófica más amplia del pragmatismo, que se originó a finales del siglo XIX con la obra de filósofos como Charles Peirce, William James y John Dewey. El pragmatismo hace hincapié en las consecuencias prácticas de las creencias y acciones y rechaza la idea de que la verdad sea una entidad fija y objetiva. En el pragmatismo epistemológico entonces no se busca al argumento o juicio más verdadero, sino aquel que basado en las mejores evidencias tiene el mayor potencial de generar consenso (Stein & Harper, 2003). Por lo tanto, si dicho juicio, aunque aproximado, apunta a la dirección correcta, es más confiable y tiene mayores posibilidades de que sea aceptado por las partes interesadas (Harper & Stein, 2018). El pragmatismo epistemológico es una perspectiva que explora la relación entre el conocimiento y su uso haciendo hincapié en la importancia de las consecuencias prácticas y la utilidad para determinar la verdad o validez de las creencias (Samarapungavan et al., 2006). El pragmatismo epistémico entonces sugiere que el valor del conocimiento reside en sus implicaciones prácticas y en su capacidad para guiar la acción para la toma de decisiones (Bromley, 2008) e incrementalmente mejorar la generación de conocimiento en el futuro (Isaeva et al., 2015).

En particular para la EIA, se propone que un proceso pragmático de toma de decisiones debe ser eficiente, adaptable, pertinente, realista, basado en la experiencia e incremental (Lawrence, 2000). Del pragmatismo epistémico, nace el concepto de razonamiento abductivo. Este se refiere al procedimiento racional que permite encontrar la mejor explicación dentro de un

conjunto de hipótesis alternativas inmersas en alta incertidumbre, en lugar el mejor conocimiento o el mecanismo más verdadero (Behfar & Okhuysen, 2018).

•**Holismo:**

El holismo epistémico es una postura filosófica que hace hincapié en la interconexión e interdependencia de conocimientos y creencias. Uno de los primeros defensores del holismo epistémico fue W.V. Quine, quien sostenía que el conocimiento es holístico y que las creencias individuales no pueden evaluarse aisladamente del resto de nuestras creencias y conocimientos (Sober, 2000). El holismo epistémico cuestiona la idea de que el conocimiento pueda dividirse claramente en unidades discretas e independientes, y en su lugar sugiere que el conocimiento es una compleja red de creencias y conceptos interconectados. Según Quine, todas las creencias están interconectadas y son mutuamente dependientes y cualquier creencia puede ser revisada a la luz de nuevas pruebas o experiencias.

El holismo epistémico en las ciencias de la sostenibilidad reconoce que los desafíos de la sostenibilidad como el cambio climático, la contaminación y la pobreza son tan complejos que requieren un enfoque integrador e interdisciplinario que vaya más allá de las perspectivas reduccionistas o centrándose en disciplinas aisladas (Orgill et al., 2019; Suldovsky et al., 2018).

•**Virtuosismo:**

La epistemología de las virtudes de (Sosa, 2007) es una postura que enfatiza el papel de las virtudes intelectuales en la generación y justificación del conocimiento. Conforme a su teoría llamada AAA, Sosa sostiene que para que una afirmación sea verdadera debe ser exacta (Accurate), competente (Adroit) e idónea (Apt). Las afirmaciones verdaderas entonces no pueden depender de creencias personales, apariencias o usos lingüísticos, sino el resultado de razones sólidas y robustas para creerlas. Sosa también propone que se debe entonces cultivar virtudes intelectuales como la apertura mental, la curiosidad, el pensamiento crítico, la humildad y la perseverancia para abordar los problemas con una perspectiva más amplia y participar en procesos de producción de conocimiento y toma de decisiones más eficaces y responsables.

Lo anterior implica que el conocimiento sobre impactos ambientales debe ser (1) exacto o válido, en términos de cumplir con el propósito de identificar los impactos ambientales que causaron o podrían causar daño o daño significativo, (2) competente, porque se basa en

evidencias empíricas analizadas con rigor e (3) idóneo, porque el resultado final no es producto del azar sino de razones plenamente justificadas.

### **Empoderamiento**

El **Empoderamiento** se define como el respeto percibido de las partes interesadas en la producción de conocimiento para la toma de decisiones. Este concepto se retoma de la definición de legitimidad de (Cash et al., 2002, 2003), pero se renombró por la connotación que tiene el concepto de legitimidad en leyes. En la práctica, el empoderamiento consiste en demostrar que las representaciones de la realidad de las partes interesadas (sus visiones, información, experiencia, creencias y valores) son efectivamente incorporadas durante los procesos de toma de decisiones y son accesibles a todas las partes mediante mecanismos formales. Esto implica que se atienden los sesgos disciplinarios y se reduce la desigualdad de poder en la producción de conocimiento. Para determinar el **empoderamiento** de las partes interesadas es necesario incluir los siguientes atributos de inteligibilidad, portabilidad y racionalidad.

- **Inteligibilidad** se refiere a la capacidad de comprender, integrar y sintetizar cuestiones científicas y tecnológicas complejas a manera de hacerlas accesibles e informativas a todas las partes interesadas (Gould et al., 2019; Jasanoff, 2004).

- **Portabilidad** se refiere a la habilidad de traducir y estandarizar conceptos, instrumentos, prácticas y tecnologías a distintas esferas (científicas, técnicas, sociales, culturales, políticas) con el fin de facilitar la comunicación y diseminación de conocimiento y tecnologías (Jasanoff, 2004; Salter & Faulkner, 2011).

- **Racionalidad**

La racionalidad es el proceso de utilizar argumentos razonados, evidencia y principios lógicos para llegar a justificaciones o demostraciones sobre la veracidad de una afirmación (Alexander, 2000). Por lo tanto, toda afirmación sobre un impacto ambiental que no esté bien fundamentada en argumentos o razones transparentes se debe considerar como irracional (Kontic, 2000). De esta manera, la racionalidad sirve para lograr evaluaciones de impactos ambientales respaldadas con evidencias y mecanismos causales que pueden soportar el escrutinio de las partes interesadas, los organismos reguladores y el público en general.

En la práctica, una taxonomía mínima incluye tres tipos de racionalidad pertinentes en el contexto de la EIA (Elling, 2009; Kinoshita, 2005; Li et al., 2014; Simon, 1976): substantiva (o



instrumental), procesal (o acotada) y expresiva. Estas racionalidades se han denominado como cognitiva-instrumental, moral-práctica y estético-expresiva, respectivamente.

La racionalidad instrumental busca la evaluación sistemática de creencias y valores para determinar la manera más efectiva de alcanzar un objetivo. Una EIA instrumentalmente racional implica que la identificación de los impactos ambientales puede formularse como un problema de optimización.

La racionalidad acotada se refiere a que la toma de decisiones está limitada a las restricciones cognitivas humanas que requieren el procesamiento de toda la información disponible para tomar decisiones plenamente racionales (Simon, 1990, 1991). Esta racionalidad se basa en que los individuos tienen recursos cognitivos limitados y deben tomar decisiones basadas en información incompleta. Esta racionalidad busca evitar heurísticas y simplificaciones que los individuos utilizan para decidir bajo las restricciones a las que se enfrentan. En su lugar, el objetivo en una EIA es establecer un comportamiento racional a través de un proceso de deliberación que refleje la pluralidad de las preocupaciones medioambientales para identificar impactos de manera “satisficiente” (es decir, encontrando soluciones satisfactorias y suficientes) sin contar con información perfecta y completa.

La racionalidad expresiva refleja la necesidad de las personas de reafirmar su identidad. Reconoce que las emociones (como el entusiasmo, los deseos, los sentimientos de simpatía y las emociones opuestas como el miedo, la aversión o la ira) son racionales cuando transmiten preferencias en la toma de decisiones y producen resultados esperados o explicables. Así pues, por ejemplo, la respuesta de los pueblos tribales e indígenas a los impactos sobre el patrimonio biocultural no es irracional, sino una manifestación de racionalidad expresiva que refleja su deseo de mantener su identidad cultural.

### **2.3 Componente metodológico-tecnológico**

El componente metodológico-tecnológico consiste en la implementación del Principio 9 de Progresividad Científica y Tecnológica de la Declaración de Río sobre Medio Ambiente y Desarrollo para fomentar la racionalidad al producir, analizar, sintetizar, traducir, comunicar y mediar conocimiento útil para la gobernanza de la complejidad socioambiental en la EIA. Esta propuesta retoma dos criterios reportados como fundamentales porque fomentan la gobernanza para la sostenibilidad: la eficiencia y la eficacia (Adger et al., 2003).

## **Eficiencia**

La **eficiencia** concierne la dimensión operativa de la EIA que permite la generación de conocimiento útil para la toma de decisiones de manera pragmática e incremental (Lawrence, 2003b) . La eficiencia se refiere a la forma de maximizar la formación de acuerdos sin sacrificar la credibilidad y relevancia. Con respecto al empoderamiento, la eficiencia es la forma como se vuelve operativa la portabilidad y racionalidad del sistema de conocimiento. Los dos criterios mínimos para promover la eficiencia son la sistematicidad y replicabilidad y rigor metodológico.

•**Sistematicidad y replicabilidad:** se refiere a la utilización e innovación de métodos, algoritmos, procedimientos, protocolos y buenas prácticas para producir conocimiento confiable y útil para la toma de decisiones. Estos métodos deben estar estructurados para producir resultados repetibles, esto es, que se pueda demostrar que con los mismos insumos se obtienen los mismos resultados (Bojórquez-Tapia & García, 1998). Adicionalmente, en ciencias de la sostenibilidad se busca aprovechar e integrar innovaciones científicas y tecnológicas de disciplinas múltiples para facilitar la conducción de procesos colaborativos de toma de decisiones a manera fomentar su inteligibilidad, confiabilidad y reproducibilidad (Bojórquez-Tapia et al., 2017).

•**Rigor metodológico** se refiere a la estandarización de métodos que incluyan reglas de inferencia estrictas, con el fin de producir conocimiento confiable y válido. Las reglas de inferencia se refieren al conjunto de pasos formales para realizar razonamientos lógicos y obtener resultados racionalmente válidos (Bojórquez-Tapia, 1989; Smith & Theberge, 1987) y la forma como fueron validadas las inferencias. Por lo tanto, el rigor metodológico está muy relacionado con el atributo de portabilidad de conocimiento descrito en la sección de empoderamiento.

## **Efectividad**

La **efectividad** concierne la dimensión sustantiva de la EIA a través de la generación y utilización de conocimiento e innovaciones metodológicas y tecnológicas para la toma de decisiones pragmáticas, plurales, holistas y virtuosas que fomenten su credibilidad y relevancia. Con respecto al empoderamiento, la eficiencia es la forma como se vuelve operativa la inteligibilidad del sistema de conocimiento. Los tres criterios mínimos son la traducción y comunicación, la deliberación y la mediación y formación de consenso. Cabe señalar que la

efectividad corresponde a las formas en las que metodológica y tecnológicamente se implementa el Acuerdo de Escazú en lo relacionado al acceso a la participación abierta e inclusiva desde etapas iniciales del proceso de toma de decisiones y se fundamenta la forma como se tomaron en cuenta las observaciones del público.

- **Traducción y comunicación:** Retomando el Acuerdo de Escazú, se refiere al proceso colaborativo de generación y divulgación de conocimiento en lenguaje no técnico y comprensible. De las ciencias de sostenibilidad, se retoma el concepto de objetos fronterizos como los artefactos de comunicación y traducción para facilitar el diálogo entre las partes interesadas mediante representaciones accesibles (inteligibles) de conocimiento (Cash et al. 2003; Pedroza-Paez et al. 2020).
- **Deliberación:** se refiere al proceso heurístico y recursivo en el que las partes generan conocimiento colaborativamente (Dietz, 2013; Dietz & Stern, 1998; National Research Council, 1996; Petts, 2003). El proceso debe constituir una discusión estructurada en las que se examinan formalmente todas las perspectivas de las partes interesadas.
- **Mediación y consenso:** se refiere al proceso de facilitación, moderación y negociación en los procesos de toma de decisiones. Para que este proceso se logre se requiere indispensablemente ofrecer espacios seguros, abiertos e inclusivos de colaboración que posibiliten el diálogo de las partes interesadas, en lo que se denominan “condiciones ideales deliberación” para la generación de acuerdos (Innes & Booher, 2010; Petts, 2003).

### **3. Artículo publicado: Analytic deliberation approach for collaborative determination of impact significance of projects in dispute, a case study in Mexico**



Contents lists available at ScienceDirect

# Environmental Impact Assessment Review

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/eiar](http://www.elsevier.com/locate/eiar)

## Analytic deliberation approach for collaborative determination of impact significance of projects in dispute, a case study in Mexico

Paola Gómez-Priego, Luis Antonio Bojórquez-Tapia\*

Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad, Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, México

## ARTICLE INFO

## Keywords:

Environmental impact assessment  
 Geovisualization  
 Fuzzy logic  
 Analytic deliberation  
 Environmental dispute  
 Expert judgment

## ABSTRACT

The determination of impact significance is a critical step in Environmental Impact Assessment (EIA). Yet, the notion of impact significance is inherently subjective, immersed in uncertainty, and influenced by competing interests. This article addresses the difficult task of collaboratively determining the significance of the environmental impacts of projects in dispute. We introduce an approach centered on analytic deliberation that entails three steps: analysis, translation, and deliberation. Analysis combines and synthesizes impact significance into a single index using a fuzzy pattern classification algorithm, which also integrates the inherent uncertainty of impact assessment. Translation transforms the index into understandable and accessible spatial representations through geovisualization. Deliberation promotes safe spaces for collaboration in which stakeholders examine evidence openly and reflect on the conflicting values underlying their perspectives. The outcome of the approach is a compromise on the most meaningful representation of impact significance, if one exists, as the basis for agreement on the appropriate prevention, mitigation, and compensation measures of a project. Hence, it helps to reach agreement on the impact prevention, mitigation, and compensation strategy prior to the consultation process required by law in most countries. We illustrate our approach through an example from Mexico.

## 1. Introduction

Globally, Environmental Impact Assessment (EIA) is the most institutionalized environmental tool for sustainable development. Over the last forty years, EIA has been recognized as a key decision-making tool to promote sustainable development by most countries in the world, the UN international conferences, and the safeguards of international financing institutions (Abaza et al., 2004; Bojórquez-Tapia and Ongay-Delhumeau, 1992; Loomis et al., 2022; Morgan, 2012; UNEP, 2018). EIA requires that the most relevant information is considered in the decision-making process to prevent the adverse effects of new projects on the environment. While it has been assumed that public participation is one of its essential elements (Loomis et al., 2022; Wood, 2014), EIA has been typically carried out within an adversarial system in which the project proponent supplies all the information concerning the environment (Wood et al., 2007). Consequently, consultation and public scrutiny of EIA is a critical procedural step that environmental authorities must take before sanctioning projects (Eckerdt, 2017; Loomis and Dziedzic, 2018; Hartley and Wood, 2005). In environmental disputes (Crowfoot and Wondolleck, 2012; Sidaway, 2005), projects are

challenged for their complexity and potential adverse effects, and authorities face not only scientific uncertainty and urgency but considerable social mistrust (Balint et al., 2011). Within the EIA process, an environmental dispute is the manifestation of the value conflicts regarding the meaning of “impact significance” as it remains subject to interpretation from diverse and contested viewpoints of environmental quality and change (Duinker and Beanlands, 1986; Ehrlich and Ross, 2015; Sippe, 1999; UNEP, 1999; Wood, 2008).

Operationally, the determination of impact significance is challenging (Lawrence, 2007a). While some countries have substantially strengthened their EIA legal, scientific, and methodological frameworks and gained considerable experience in its implementation (UNEP, 2018), socio-environmental systems are inherently complex and uncertain (Innes and Booher, 2010; Musters et al., 1998). Consequently, the determination of impact significance is inherently subjective and influenced by competing and often conflicting interests (Bernstein and Zalinski, 1983; Briggs and Hudson, 2013; Weston, 2004). In disputed projects, EIA not only requires the use of rigorous, replicable methods developed by experts to acquire rigorous facts based on scientific evidence, but also a discussion and reflection about the different

\* Corresponding author.

E-mail address: [bojorquez@ecologia.unam.mx](mailto:bojorquez@ecologia.unam.mx) (L.A. Bojórquez-Tapia).<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107091>

Received 5 September 2022; Received in revised form 9 March 2023; Accepted 15 March 2023

Available online 23 March 2023

0195-9255/© 2023 Elsevier Inc. All rights reserved.

perspectives that arise from values and uncertainties associated with a project (Lawrence, 2007b). As an essential step in gathering the relevant information for disputed projects, therefore, the determination of impact significance should incorporate procedures that encourage an open examination and debate of such perspectives.

Analytic deliberation has been defined as the process to gain a better understanding of socio-environmental issues and concerns and to reach an agreement among stakeholders (Akamani et al., 2016; Dietz, 2013; Dietz and Stern, 1998; Gunderson, 2018; NRC, 1996; Petts, 2003). The analytical component is achieved by systematically applying scientific theories and methods. The deliberation component is achieved by discussing the inevitable conflicts of judgments and values that offer insights and knowledge into the issues of concern. Within the context of EIA, analytic deliberation consists of a structured discussion among scientists, authorities, and stakeholders to attain a better understanding of the implications of different knowledge and perspectives about a project's effects (Petts, 2003).

One basic requirement of analytic deliberation is the translation of information and data into an accurate and informative synthesis. Hence, there is a need for approaches that rigorously and systematically combine and translate knowledge. Also, these approaches should facilitate organized discussions of the diverse meanings of impact significance. Accordingly, analytic deliberation should incorporate both a space dedicated to the examination of facts according to evidence and the reflection of the meanings of impact significance to stakeholders. Regarding the translation and communication of impact significance, the uncertainties of socio-environmental systems compel addressing the unavoidable distortions associated with language, often referred to as linguistic uncertainty (Bojórquez-Tapia et al., 2022; Regan et al., 2008). The outcome should be a compromise on the best representation of impact significance, as the basis for agreement on the appropriate prevention, mitigation, and compensation measures of a project.

Here we present an approach to engaging stakeholders constructively in the determination of the impact significance of disputed projects. The approach simplifies the application of analytical deliberation to achieve a better understanding of the different perspectives on the importance of impact significance. This simplification is achieved by incorporating geovisualization as a tool to synthesize, translate and communicate impact significance representations. Our approach addresses three key elements of analytic deliberation for the determination of impact significance. Regarding the analytical component, it provides a procedure to combine the results of impact assessment into a single index, while addressing the inherent uncertainty of impact significance. Because the notion of impact significance is always ambiguous, vague, and imprecise, our approach benefits from a fuzzy pattern classification algorithm (FPC) coupled with geospatial analysis (Bojórquez-Tapia et al., 2002). Regarding the deliberation component, it enables the collective construction of the meaning of impact significance. This objective is achieved through the implementation of a heuristic, recursive, and collaborative process to determine impact significance. In recognition of the challenges in EIA, we developed a procedure that enables an open examination of opposing perspectives about what constitutes a significant impact. This collaborative procedure compels a justification about the reasoning underlying a perspective from stakeholders and extended peer communities. Our illustration shows a transformation of an initially adversarial context into a deliberative impact significance process. Regarding the whole process, it simplifies the interaction with stakeholders through geovisualization, a tool designed to translate the output of geospatial analysis into understandable and accessible representations. Specifically, we implemented geovisualization through the web-based application *SIGNificance*. We illustrate our approach through an example of the analytic deliberation process concerning the significance of a set of impacts of a highly disputed tourism mega-project in Mexico.

## 2. Approach

The analytic deliberation approach includes three steps: (1) analysis, (2) translation, and (3) deliberation.

### 2.1. Step 1. Analysis

Analysis is a continuation of the scoping phase of EIA (see Lawrence, 2003; Petts, 1999) in which a team of interdisciplinary specialists evaluates the baseline conditions of the territory in which a project is to be carried out. Participatory workshops are carried out to identify the stakeholders' issues and concerns to be included in the analytic deliberation process. Multicriteria Decision Analysis techniques (e.g., Cloquell-Ballester et al., 2007; Wanderer and Herle, 2015) are implemented to identify the minimum set of impacts based on a set of criteria, which may include items such as controversy, cumulative effects, uncertainty, and absence of regulations. The output is the set of impacts that the stakeholders agree are the most important according to their perspectives. For the sake of clarity, we omit further explanation of these techniques.

The interdisciplinary team of specialists then assesses the minimum set of impacts using two indexes: (1) interaction intensity and (2) environmental vulnerability. The interaction intensity index may include variables magnitude, spatial extent, duration, cumulative effects, reversibility, synergy, and controversy. This index can be implemented through an assortment of methods, such as Bojórquez-Tapia et al. (2002), Canter and Hill (1979), Dee et al. (1973), and Ijäs et al. (2010). The vulnerability index may include variables susceptibility, exposure to harm, and resilience of an environmental component. This index can be implemented by adapting the methods such as Adger (2006), Eakin and Luers (2006), or Pavlickova and Vyskupova (2015). Both indexes are applied to a finite set of geographic entities to include spatial heterogeneity in the impact assessment. Value functions need to be applied to ensure the indices are commensurate with a [0,1] ratio scale in which 0 corresponded to the minimum impact or vulnerability and 1 to the maximum (Beinat, 1997; Canter and Hill, 1979).

Analysis then consists of the systematic combination of the interaction intensity and environmental vulnerability indexes for the minimum set of impacts. The results are aggregated into categories of impact significance for every geographic entity. This is achieved through a fuzzy pattern classification algorithm (FPC) (Bojadziew and Bojadziew, 1995; Bojórquez-Tapia et al., 2009; Cox, 1994; Kosko, 1992; Miller, 1956; Terano et al., 1989; Wood et al., 2007). Computationally, FPC entails (1) categorization, (2) fuzzification, (3) inference, (4) combination, and (5) defuzzification (Appendix 1). FPC included the following categories of impact significance {VL (very low), L (low), M (moderate), H (high), VH (very high)}.

Formally, the five categories correspond to their respective fuzzy sets, representing the ambiguity and uncertainty associated with the values of two adjacent categories (Fig. 1). For example, category L may imply some degree of VL. As explained in more detail in Appendix 1, the output of FPC is used to generate alternative ranges of categories of impact significance by changing only one parameter: the progression factor (PF). This parameter refers to the "just noticeable difference" or  $jnd$ , a term used in psychophysics to describe the relationship between the physical intensity of a stimulus and its perception by the brain (Dehaene, 2003; Lootsma, 1999; Saaty and Vargas, 2012).

The PF is used in our approach to modifying the category ranges of FPC. Equidistant category cuts imply linear increments of impact significance ( $VH = 5VL$ ,  $H = 4VL$ ,  $M = 3VL$ , and  $L = 2VL$ ). In contrast, category cuts with a  $PF = 2$  imply geometric increments of impact significance ( $VH = 16VL$ ,  $H = 8VL$ ,  $M = 4VL$ , and  $L = 2VL$ ), and a  $PF = 1.6$  imply geometric increments of a lesser degree ( $VH = 7VL$ ,  $H = 4VL$ ,  $M = 3VL$ , and  $L = 2VL$ ). Category cuts with other PF result in different geometric increments.

Fuzzification is the process by which the degree of truth for a premise



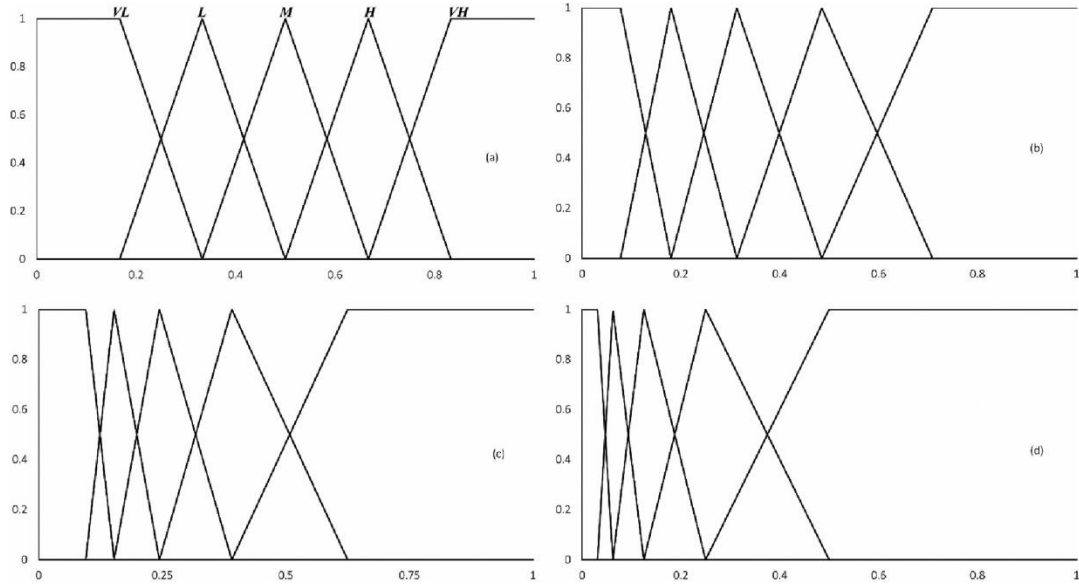


Fig. 1. Fuzzy sets of interaction intensity or environmental vulnerability indices for four progression factors (PF); the abscissa corresponds to each index and the ordinate to the membership value ( $\mu$ ). Fuzzy set (a) corresponds to equidistant classification, (b) PF = 1.5, (c) PF = 1.6, (d) PF = 2.0. VL = very low; L = low; M = moderate; H = high; VH = very high.

is determined through membership functions that transform the values of the intensity impact and the vulnerability indices into degrees of membership. Inference consists of the application of “if... and...then” rules to connect a given input to an output from which patterns can be discerned. These rules are operationalized through three  $[5 \times 5]$  decision tables (Table 1). In terms of the stakeholders’ perspectives in EIA, inference involves three different patterns: (1) stakeholders tend to minimize errors of commission or underestimating impacts, (2) stakeholders tend to minimize errors of omission or overestimating impacts, and (3) stakeholders tend to average errors of omission and commission. Combination is the procedure by which fuzzy sets are aggregated to generate a fuzzy solution space. In our approach, we use a fuzzy additive system (Kosko, 1992) to combine the fuzzy sets that result from the interaction intensity and the environmental vulnerability indices. Defuzzification converts the fuzzy solution space to a crisp number. In our approach, defuzzification is carried out through the composite moments method (Cox, 1994).

2.2. Step 2. Translation

Translation consists in using the web-based application *SIGNificance* to present the output of FPC as spatial representations in an

understandable and accessible way (Fig. 2). The interactive and iterative operation of *SIGNificance* enables users to gain a better understanding of the relationships between the geographic context and the spatial distributions of impact significance in a territory. *SIGNificance* allows for the selection of base maps (satellite map, street view, elevation model) as well as the visualization of the blueprint for the construction or operation of a project. Also, it allows for (1) the visualization of the geographic entities (such as land units) used to represent the spatial heterogeneity of a project’s impacts; (2) the visualization of different configurations of inputs (decision tables and PF) and (3) the interactive exploration of the resulting spatial representations. *SIGNificance* displays a spatial representation (a map) of the overall results, in which each geographic entity is classified according to the impact significance. The color palette in *SIGNificance* is the internationally known traffic light pattern to simplify the identification of impact significance across space.

2.3. Step 3. Deliberation

The objective of deliberation is to enable stakeholders to collectively determine the impact significance of a project. Operationally, it entails carrying out workshops that function as safe spaces for collaboration (Clark et al., 2016). Participants may include the interdisciplinary team,

Table 1 Decision tables of interaction intensity and environmental vulnerability for three patterns of impact significance: (a) Minimize errors of commission, (b) Compensatory, and (c) Minimize errors of omission. VL = very low; L = low; M = moderate; H = high; VH = very high.

	Interaction intensity														
	(a)					(b)					(c)				
	VL	L	M	H	VH	VL	L	M	H	VH	VL	L	M	H	VH
<b>VL</b>	VL	VL	VL	VL	VL	VL	L	L	M	M	VL	L	M	H	VH
<b>L</b>	VL	L	L	L	L	L	L	M	M	H	L	L	M	H	VH
<b>M</b>	VL	L	M	M	M	L	M	M	H	H	M	M	M	H	VH
<b>H</b>	VL	L	M	H	H	M	M	H	H	VH	H	H	H	H	VH
<b>Environmental vulnerability</b>	<b>VH</b>	VL	L	M	H	VH	M	H	H	VH	VH	VH	VH	VH	VH

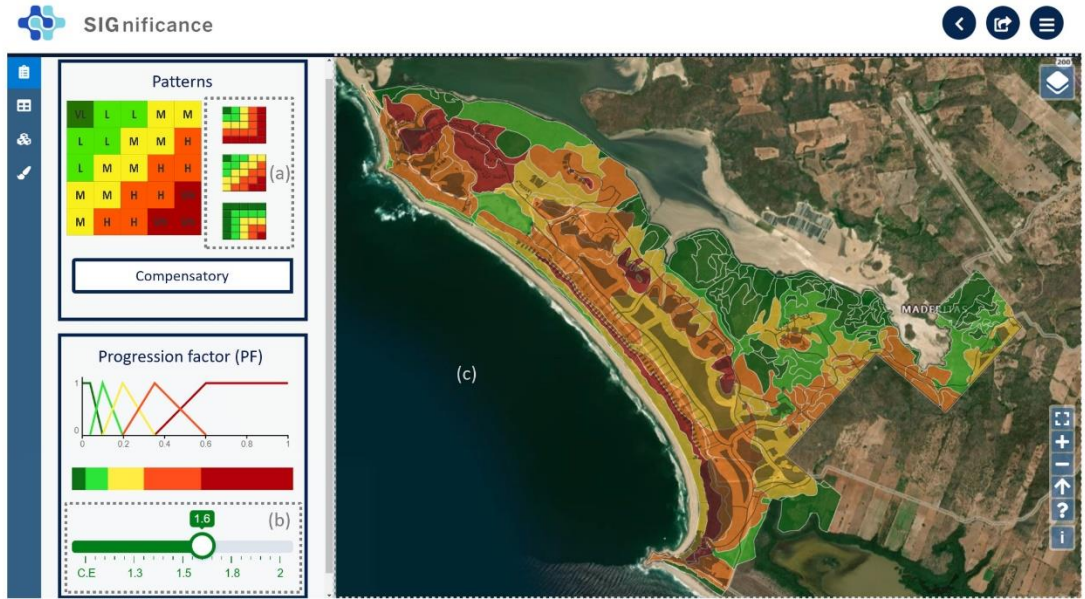


Fig. 2. Geovisualization web-based app for the determination of impact significance: SIGnificance. The dotted grey box: (a) shows the decision table buttons (perspectives); (b) the PF slider; and (c) the geovisualization display that allows for the selection of base maps and the blueprint of the project (shown overlaid in grey). C.E. stands for Equidistant Classification. VL = very low; L = low; M = moderate; H = high; VH = very high. The color palette applied to the spatial representations follows a traffic light pattern in which dark green is VL, light green L, yellow M, orange H, and dark red VH. Since SIGnificance was developed in Spanish this figure was adapted to show labels in English. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

the project proponent, environmental authorities, and representatives of civil society. One condition for a safe space of collaboration is that facilitators must be agnostic, that is, they must refrain from committing or imposing an opinion about the meaning of impact significance. At the workshops, facilitators explain the deliberation process, provide relevant information about the project, explain the methods and data used to obtain the indexes resulting from step 1, introduce the purpose and function of *SIGnificance*, facilitate dialogue, moderate debate, and focus the discussion on the minimum set of impacts. Facilitators moderate the process to ensure an open and inclusive dialogue among participants under what is known as a habermesian “ideal speech situation” (Innes and Booher, 2010). This is, all participants have the same opportunities to express their ideas in an uncoerced setting, regardless of background, affiliation, political, social, or academic standing. The deliberation process consists in evaluating each spatial representation based on the insights, evidence, and knowledge of the participants and spatial representations are heuristically ruled out solely based on reason.

As a heuristic process, deliberation starts with the participants judging the accuracy of the distribution of impact significance for each spatial representation. Thus, deliberation entails a recursive process of elimination in which participants systematically search for the “factually competent” (*sensu* Dietz, 2013) spatial representation that correctly reflects the common understanding of the distribution of impact significance. Deliberation ends when the new collective knowledge and understanding allow for an agreement on the factually competent spatial representation that should be used for the design of a feasible prevention, mitigation, and compensation strategy.

### 3. Illustration of the approach

#### 3.1. Background

To illustrate our approach, consider a highly disputed tourism mega-project in Mexico. This mega-project is located on a beach-front private

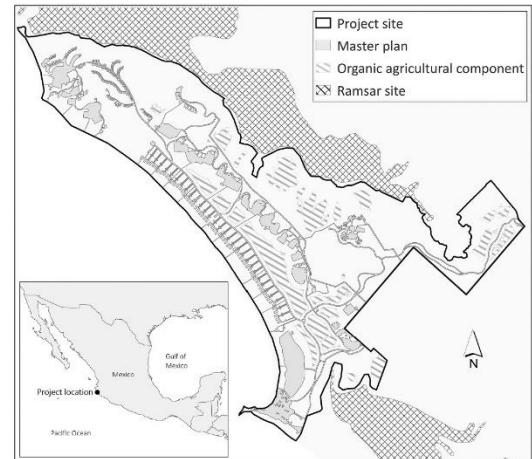


Fig. 3. Project location and master plan.



property (1180 ha) between two coastal lagoons designated as Ramsar sites, in a mostly undeveloped region of the Pacific coast (Fig. 3). The proposed project entails the creation of a new tourist destination consisting of a new coastal village, hotels (800 rooms in total), villas (1500 units), an organic agritourism landscaping component, and all the needed supporting infrastructure. The projected developed area encompassed 37% of the property.

The project was officially advertised by the then Jalisco State Governor as the “New Cancun,” in reference to the renowned tourist destination in the Mexican Caribbean (Gutiérrez, 2019). This announcement created a context of confrontation among advocacy groups and the developer because Cancun has been considered the epitome of unsustainable tourism development in Mexico (Villanueva Sánchez et al., 2018). The conservation advocacy groups publicly voiced their concerns about the potential effects of land cover change on the remnants of low dry deciduous forests and coastal dunes, two of the most degraded coastal ecosystems in Mexico. Also, they were concerned about the degradation of the Ramsar sites mainly by the potential effects of the project on mangroves and the habitat for migratory birds. To address this context of confrontation, the interdisciplinary specialist team in charge of the EIA carried out workshops with stakeholders to identify the minimum set of impacts to be analyzed. These impacts included habitat loss, soil erosion and compaction, dune loss, Ramsar site harm, and landscape degradation. The geographic entities of the project site comprise 235 land units (Fig. 4a), the most prominent being hillslopes (52% of the project), sand dunes (18%), and leveled lands (9%). The land cover of the site (Fig. 4b) included secondary vegetation and abandoned agricultural lands (56% of the site), low dry deciduous forest (30%), coastal dunes and scrubland (13%), and mangroves (1%). Baseline conditions were determined for the environmental components for each of the 235 land units.

3.2. Step 1. Analysis

The interdisciplinary team of specialists assessed the minimum set of impacts using the interaction intensity and environmental vulnerability (see Bojórquez-Tapia et al., 2002) for the 235 land units. Six equally weighted basic (magnitude, extension, duration) and complementary (synergy, accumulation, and controversy) indicators were aggregated through the interaction intensity index and two indicators (sensitivity and distance to the source of impact) through the vulnerability index.

Geospatial analysis was used to systematically transform the original values of variables into indicators using value functions (Malczewski and Rinner, 2015). For example, the magnitude of impact soil erosion calculated through the universal soil loss equation (USDA-ARS, 2014) was transformed into an indicator score using a sigmoid value function. The indicator score depicted the relative magnitude of erosion for each land unit, and thus the results incorporated the spatial heterogeneity into the impact assessment. As each indicator is a transformation of the natural values of a variable into a [0,1] ratio scale, the resulting scores were commensurate and then aggregated to obtain the interaction intensity and vulnerability indexes. The results were then compiled into a matrix of 235 (land units) x 6 (minimum set of impacts). Next, FPC was applied to the matrix to combine the two indices and obtain an impact significance value for each land unit. The output of FPC is an impact significance vector for each of the three decision tables and 11 category ranges (Equidistant classification and PF = 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, and 2.0).

3.3. Step 2. Translation

In step 2 *SiGnificance* was used in a collaborative setting to translate the output of FPC into 33 spatial representations. Translation started by explaining the three components of *SiGnificance*: (1) geovisualization display (2) decision table buttons, and (3) *PF* slider. As regards the geovisualization display, the facilitator explained the study region and provided the geographic context by changing base maps and zooming in and out to allow participants to get familiarized with the spatial representations. The facilitator then enumerated the environmental characteristics of the land units and displayed the blueprint of the project. As regards the decision table buttons, the facilitator demonstrated the fuzzy inference process for each pattern and their respective distribution of impacts on the spatial representations. As regards the *PF* slider, the facilitator clarified the effect of modifying the *PF* to explore interactively different category cuts by increasing the slider from equidistant to a *PF* of 2.

3.4. Step 3. Deliberation

In step 3, workshops were carried out to determine collectively, through analytic deliberation, a spatial representation of impact significance for the minimum set of impacts. The participants included the

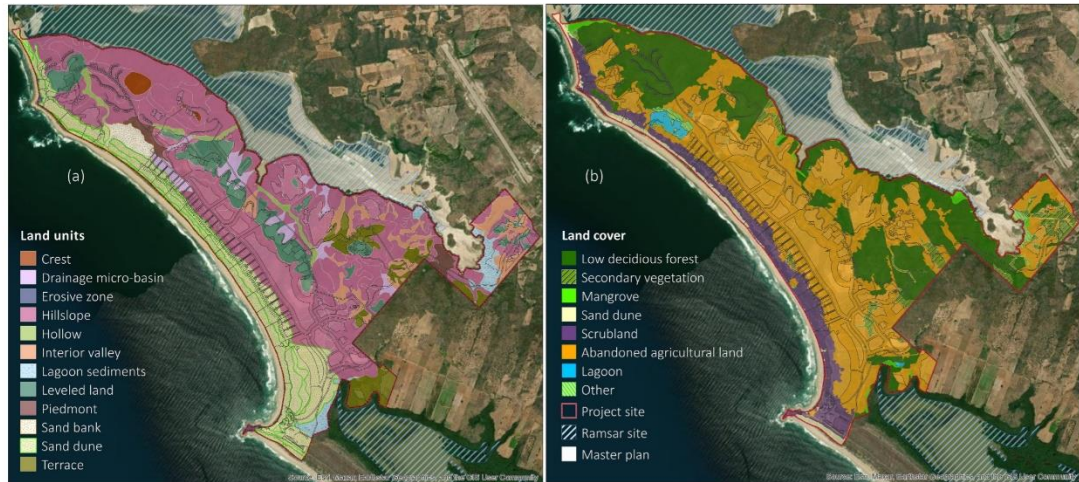


Fig. 4. Project site land units (a) and land cover (b).



interdisciplinary team, the developer, conservation advocacy groups, and environmental authorities. The results corresponded to the most meaningful representation and served as a basis for agreement toward the development of a strategy of impact prevention, mitigation, and compensation.

The participants collectively analyzed and judged the distribution of impact significance of each spatial representation. Operationally, the facilitator showed each spatial representation, and the participants explained their judgment on the accuracy of the distribution of impact significance. In the first round of deliberation, the conservationists and authorities rejected the spatial patterns resulting from equidistant classification (Figure a-c) arguing that the output utterly underestimated

impact significance attributable to habitat loss, particularly of low deciduous forest, and landscape degradation on hillslopes, leveled lands, and sand dunes. In contrast, the developer rejected the spatial patterns resulting from  $PF = 2$  (Figure j-l) arguing that the output severely overestimated impact significance attributable to soil erosion and compaction, habitat loss, and landscape degradation on already degraded agricultural land.

One point of contention arose during the workshops. It concerned the validity of the biodiversity data used as input for analysis. A representative of the conservation advocacy group argued that the available information on biodiversity was insufficient to make an informed judgment on the effects of habitat loss. The interdisciplinary team then

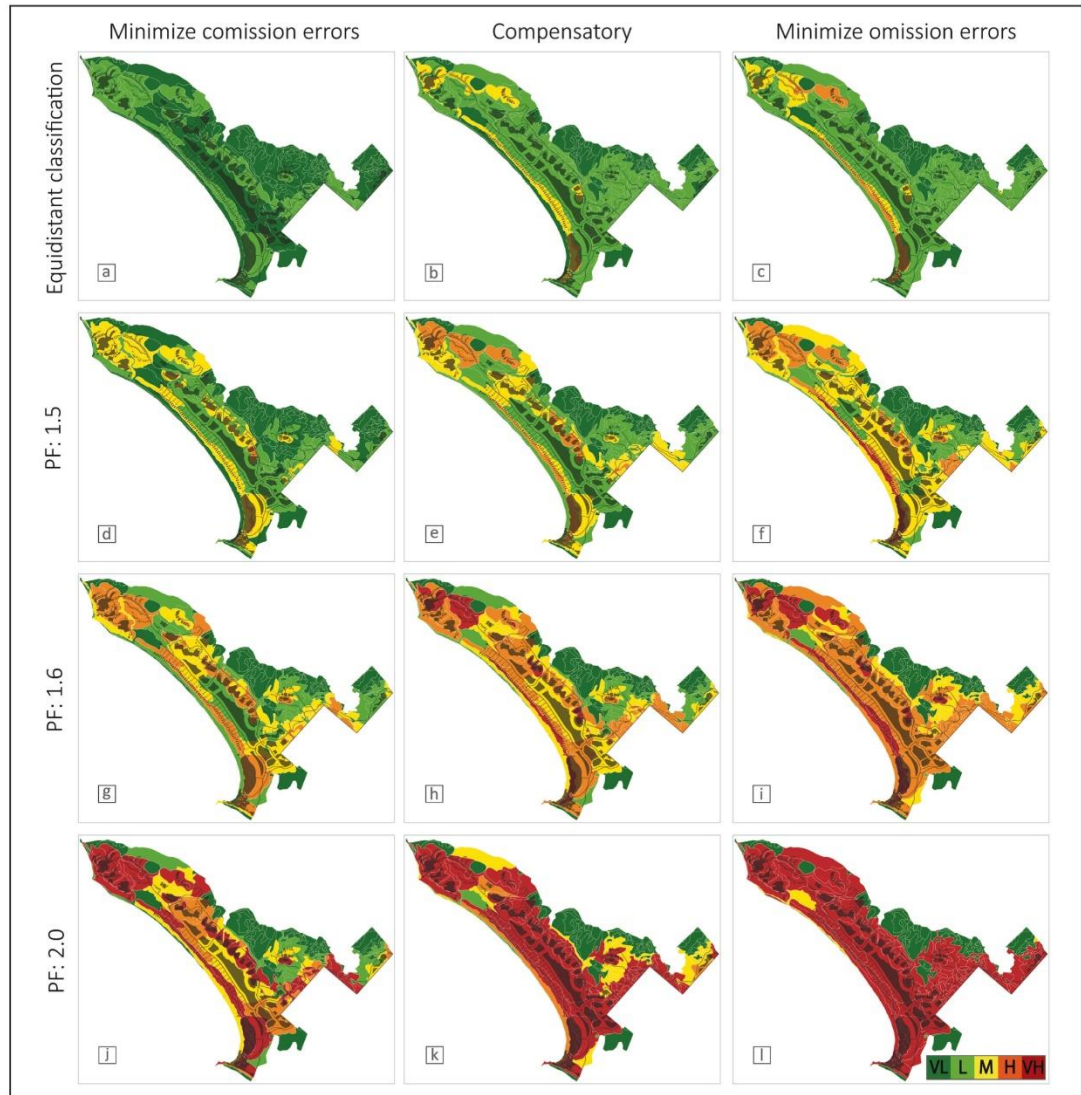


Fig. 5. Spatial representations of impact significance of a minimum set of impacts with tree perspectives (decision tables) and four out of eleven category cuts resulting from their respective progression factors (PF); dark grey = master plan; VL = very low; L = low; M = moderate; H = high; VH = very high.

explained how the interaction intensity index incorporated the uncertainty of the input data (through *ad hoc* value functions and the indicator controversy), and facilitators centered the deliberation on finding the representations that accommodated such uncertainty while avoiding an oversimplification of impact significance by making all land units *VH*. After pondering the evidence provided, the representative of conservationists acknowledged that additional biodiversity data would not improve the outcome of the determination of impact significance. Participants, therefore, accepted the arguments of the first round of deliberation, and the spatial representations of equidistant classification and  $PF = 2$  were discarded from further analysis. Furthermore, there was agreement on an important point of contention regarding the Ramsar sites: regardless of the decision table or  $PF$ , impact significance was higher than *VL* in only two land units draining to the coastal lagoons.

In an ensuing round of deliberation, participants agreed that the output of  $PF = 1.5$  conveyed better information regarding the impact significance across the project site. However, conservationists and authorities strongly argued that the output of the decision table *minimize commission errors* but still underestimated the effects of habitat loss and landscape quality, particularly on hillslopes covered with low deciduous forest. Hence, deliberation focused on the output of  $PF = 1.6$ . The output of the decision table *minimizing omission errors* categorized impact significance as *H* and *VH* on more than two-thirds of the project site. The developer disputed this result because of the incongruence of categorizing impacts of organic agritourism on degraded land units as equally significant as the construction of the supporting infrastructure and villas on land units with secondary vegetation. The developer contended that the impacts of supporting infrastructure were relatively small, depending on the location. In this line of thought, impact significance could not be higher than *L* on hillslopes on degraded lands and *M* on hillslopes covered with low deciduous forest, as portrayed in Fig. 5g. Conservationists and authorities were skeptical of this claim and required further evidence to reexamine their judgments. The developer then explained the design and measures added to the project that included utilizing existing roads to prevent further deforestation and habitat fragmentation, pervious pavement to allow infiltration, and underground electrical distribution system to prevent bird electrocution.

Given the evidence, conservationists and authorities accepted that the spatial representation conveyed by Fig. 5i overestimated impact significance, but pointed out that the output shown in Fig. 5g underestimated it on three major issues: (1) soil erosion and compaction and habitat loss by the construction of the small village, hotels, villas on sand dunes with scrublands; and (2) erosion and compaction on leveled lands from the construction of villas (the area affected in two land units was above 70%); and (3) habitat loss and landscape quality degradation by the construction of villas, hotels, and supporting infrastructure on hillslopes covered with low deciduous forest. Accordingly, the output of the decision table *compensatory* with  $PF = 1.6$  was accepted as the most meaningful representation of impact significance (Fig. 5h).

In this representation, category *VH* corresponded to habitat loss in low deciduous forest and scrubland, and soil erosion and compaction in leveled lands. Category *H* corresponded to soil erosion and compaction of sand dunes, abandoned agricultural land on hillslopes, and habitat loss on isolated patches of low deciduous forest. Category *M* corresponded to landscape degradation on abandoned agricultural land. Category *L* corresponded to land units of low vulnerability and minimum development. Category *VL* corresponded to land units not affected directly or indirectly by the construction or operation of the project.

Once a spatial representation was agreed upon, deliberation turned to generate consensus on the prevention, mitigation, and compensation strategy. This entailed setting targets to ensure a maximum tolerable impact significance after the execution of the project. The developer, conservationists, and authorities agreed on (1) land units with an environmental vulnerability index higher than 0.5 were required to achieve a residual impact significance equivalent to *VL*, and (2) land units with vulnerability lower or equal to 0.5 to achieve a residual

impact significance equivalent to *L*.

Because the Mexican environmental legislation requires a disaggregated assessment of environmental impacts, we employed *SIGNificance* to generate the alternative spatial representations of impacts on specific environmental components. For example, we used *SIGNificance* to analyze the impacts on habitat of endangered wildlife and endemic plants. In the workshop, the facilitator showed the results of interaction intensity and environmental vulnerability indexes (Fig. 6) and encouraged deliberation. Participants agreed that the results that best represented the spatial patterns were (1)  $PF = 1.6$ , because it accounted for the difference between impacts on sand dunes and low deciduous forest-covered hillslopes (Fig. 6a), and (2)  $PF = 2.0$ , because it clearly depicted the pattern of vulnerability in sand dunes along the coast (Fig. 6b). Next, the participants collectively examined the output of *SIGNificance* and agreed that the spatial representation for  $PF = 2.0$  of decision table *minimize commission errors* was the best representation of impact significance at the project site (Fig. 6c).

#### 4. Discussion

Bond et al. (2015) state that the use of analytic-deliberative techniques is not common in impact assessment practice. Arguably, one deterrent to using these techniques has been that they are time and cognitively demanding (Bond et al., 2011). Our approach substantially reduces the investment of time and resources in collaborative processes for the determination of impact significance by decomposing analytic deliberation into three key elements: (1) analysis, (2) translation, and (3) deliberation.

Regarding analysis, our results corroborate Wood et al. (2007) assertion on the utility of fuzzy-sets analysis as a framework for accommodating the ambiguity, vagueness, and imprecision of the notion of impact significance. Moreover, results also substantiate Antunes et al. (2001) observation on the advantages of spatially explicit impact assessment techniques for the consistency of the inference rules used to determine impact significance. In our approach, FPC combines the interaction intensity and vulnerability indexes into impact significance scores that reflect the heterogeneity of the land units in the project site. The output of FPC can be traced and replicated, which in turn increases the transparency of EIA.

Regarding translation, our approach addresses one ineluctable problem of EIA. In large and complex projects such as the one in our example, it is challenging to synthesize the massive amounts of information resulting from scoping and impact analysis in a way suitable for a broad interpretation by the public. In this respect, *SIGNificance* displays the results of impact analysis in a non-technical format that is understandable to laypeople. Analogous to Wood et al. (2007) findings, moreover, FPC effectively captures the vague and subjective character of natural language and enables better communication of judgments about the particular circumstances in the land units. The spatial representations of *SIGNificance* thus simplify a systematic interpretation of otherwise cryptic appraisals of impact significance.

Regarding deliberation, the use of *SIGNificance* in participatory workshops proved useful for structuring a heuristic approach to identify the best spatial representation of impact significance. Our results demonstrate that geovisualization can make a difference in achieving an open interaction between scientists, authorities, and stakeholders that hold opposing perspectives in the context of projects in dispute. *SIGNificance* enabled the stakeholders to interchange their thoughts, opinions, or information and thus enriched the discussion of the factual merits of the perspectives portrayed in the spatial representations. For example, the perspective of the developer (equidistant and minimizing commission errors) was ruled out because it underestimated the impacts of the construction of villas and supporting infrastructure on natural habitats (Fig. 5a), while the perspective of conservation advocacy groups ( $PF = 2$  and minimizing omission errors) was ruled out because it overestimated the impacts of organic agriculture and construction of



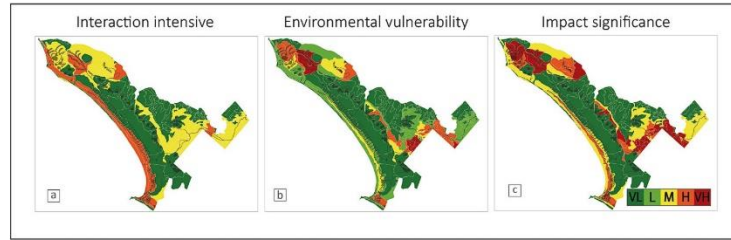


Fig. 6. Spatial representations of environmental intensity, environmental vulnerability indexes, and impact significance on habitat of endangered wildlife and endemic plants; labels and colors as in Fig. 5.

villas and supporting infrastructure on abandoned agricultural land (Fig. 5l). This recursive procedure of elimination was finalized when an agreement was reached on a factually competent spatial representation (Fig. 5h). Drawing from Dietz (2013), we argue that the recursive process as a tool in deliberation is effective in dealing with conflict and helps build consensus; it induces an open examination of the value judgments underlying a factually competent spatial representation.

Legislation in most countries generally requires a disaggregated assessment of impacts on specified environmental components. In the illustration of the approach, we have shown how *SIGNificance* can be used to assess the significance of impacts by one environmental component at a time (Fig. 6). In like manner, *SIGNificance* can also be used to show the territorial units where some regulatory threshold for an environmental variable would be exceeded by the impacts of the proposed activities.

Burgess et al. (2007) highlight the importance of consistency and transparency in deliberation processes. Hence, a contrast may be drawn between *SIGNificance* and other techniques such as interaction matrices that rely heavily on expert judgment for the appraisal of impacts. The integration of data and knowledge is straightforward in *SIGNificance*. Users alternate between decision tables and *PF* values to visualize how their viewpoints generate different categorizations of impacts across the land units. In this way, *SIGNificance* simplifies the exploration of how epistemic and linguistic uncertainty shape either convergence or divergence of judgments about contested impacts while enabling transparent and auditable impact assessment processes.

We agree with Wilkins (2003) that proving neutrality and objectivity in EIA is unrealistic, particularly in cases characterized by scientific uncertainty, mistrust, value conflicts, and urgency. We contend that a recursive and heuristic approach should not aim to attain a purportedly impartial assessment. Instead, the goal should be the implementation of an empirically valid analytic deliberation process that accurately translates the multidimensional meanings of impact significance. Consequently, an agnostic attitude toward the meaning of impact significance is always appropriate. It is worth noting that the use of *SIGNificance* during deliberation is intended to address challenges related to the determination of impact significance arising from contested viewpoints of environmental quality. As such, this step should be part of the impact analysis phase of the EIA. In this way, our approach helps to reach an agreement on the prevention, mitigation, and compensation strategy prior to the consultation process that, according to Cashmore (2004), typically occurs once the final EIA has been published.

Our results show how *SIGNificance* helps in meeting the requirements of the NRC (1996) for analytic deliberation, which include making the relevant information available, in a readily understandable format, without oversimplifying it. Yet, one hindrance to legitimate public participation in EIA has been poor levels of engagement between the public and the impact assessment team. In this respect, we contend that the use of *SIGNificance* fulfills one important role in analytic deliberation. The use of a *posteriori* category cuts prevents the onset of what Duncan and Lach (2006) refer to as the “map tyranny” of expert

knowledge that conceives participants as passive receivers of information. On the contrary, the exploration of all possible outputs of FPC turns participants into active agents in the determination of the most meaningful spatial representation of impact significance.

One of the challenges of EIA is to address the potential misrepresentation of impacts by stakeholders, which can manifest as exaggeration, oversimplification, fabrication, or omission of a project’s effects. Theoretically, the issue here is the semiotic distinction between the denotation and connotation of spatial representations (Couclelis and Gottsegen, 1997). Cartographic denotation corresponds to the constitutive dimension of the territory and answers the questions “where?” and “in what condition?” Denotation concerns the scientific knowledge of the actual properties and features of geographical entities, such as slope, distance to roads, and vegetation type. Connotation, for its part, conveys the meaning of a geographic entity according to the stakeholders’ purposes and answers the questions “who is affected?” and “how bad?” In *SIGNificance*, a spatial representation denotes the technical-scientific knowledge base in the form of a single impact score for each geographic entity. This knowledge base is generated by experts during analysis. During deliberation, participants can then examine the connotation of the spatial representations by varying the inputs (decision tables and *PF*) to unveil the precise meanings of controversial, subjective, and value-laden environmental impacts.

Another challenge in EIA concerns the uncertainty inherent in the interpretation of impact significance. Drawing from Lawrence (2007b), we contend that the use of *SIGNificance* enables a productive engagement between participants and experts during deliberation. In other words, participants and experts play different but complementary roles when addressing such uncertainty: the role of participants is to interpret the connotation of the spatial representations according to their subjective values, insights, and knowledge, while the role of experts is to support the participants’ arguments with technical information concerning the interaction intensity and environmental vulnerability indices. Accordingly, an agreement on a spatial representation is the outcome of a collective discussion and reflection about the different perspectives that arise from values and uncertainties associated with a project. It should be noted that we are not implying that the roles of participants and experts are fixed. On the contrary, participants may play the role of experts if deliberation is focused on the constitutive dimension of space (for example, indigenous and tribal people may provide key data on important attributes of the geographic entities that may be overlooked by scientists), or experts may play the role of participants by interpreting data from their subjective perspective (for example, selecting the spatial representation that corresponds to *VH* impact significance to a “fragile wetland”).

We acknowledge that a tool like *SIGNificance* is only as effective as the facilitation provided during deliberation. In line with Petts (2003), we assume that good facilitation entails dialogue and reflection in a non-coercive fashion. Our results demonstrate how good facilitation can transform an initially adversarial context into a deliberative impact assessment process.

Notwithstanding, three important aspects of ideal speech situations are worth considering (Innes and Booher, 1999). First, facilitators should ensure that information is conveyed and translated in a way that is understandable to the participants, in particular the methods and data of the scoping and impact analysis. In our approach, this was achieved by avoiding technical jargon during the presentations and by synthesizing results in *SIGNificance* as spatial distributions rather than tables and numbers as it is customary. Second, the process should be open to all substantial stakes in which knowledgeable representatives are included to ensure that there is a diverse input of insights. In our approach, this implies that the main issues and concerns as well as the stakeholders' representatives are identified during Scoping. Third, experts and facilitators should be able to offer detailed explanations about the assumptions and data used as the knowledge base during analysis.

Drawing from Kontic (2000), we admit that an enhancement to *SIGNificance* is adding to it the capability to generate an audit trail of data and information that can be accessed instantaneously. In our illustration, conservationists requested from facilitators the input data for the interaction intensity index and whether additional information would modify the spatial representations. Facilitators traced and provided the solicited data and evidence, but fulfilling the request was time-consuming. Even though *SIGNificance* has the option of displaying the interaction intensity and environmental vulnerability indices, one improvement would be to establish a link to a geodatabase of the basic, complementary, and vulnerability indicators developed in step 1.

On its part, we concur with (Cashmore et al., 2010) that EIA is inherently political. In practice, EIA is beset by the overt or subtle exercise of power and authority that Flyvbjerg (1996) calls the "dark side of planning." As pointed out by Formby (1990), moreover, the dark side manifests itself at different stages of the EIA process in antagonistic standing by the stakeholders. These positions take shape as the different forms of manipulations described by Enríquez-de-Salamanca (2018), which include a "deliberate ignorance" (Balint et al., 2011; McGoey, 2007, 2012) through which public agencies and powerful stakeholders seek to restrict the scope of EIA. As suggested in the neoGramscian analysis of EIA by Bond et al. (2020), deliberate ignorance is an all-pervasive component of the discourse of hegemonic actors that undermines the analytical deliberation process.

While we are cognizant of power and authority dynamics in EIA, it should be noted that mere disagreement among experts during analytical deliberation is not enough for the imputation of being biased or manipulative themselves. But neither will disagreement between experts and stakeholders be eliminated (nor should they be) nor will EIA be immune to political clout. Building upon Douglas (2008), it can then be asserted that the dark side of EIA rests on flawed logic, murky argumentation, and impunity. In short, it implies mendacity and infringement of epistemic norms of reasoning. For our approach, therefore, a primary methodological concern is whether *SIGNificance* improves the substantive effectiveness of EIA (*sensu* Loomis and Dziedzic, 2018) by enabling more transparent and open debates about impacts and their misrepresentation, if any.

We argue in line with Alexander (2000) and Elling (2009) that rationality is tantamount to accountability. It follows that rationality (in its diverse forms: cognitive-instrumental, moral-practical, and aesthetic-expressive) is essential to neutralize the dark side, under the pragmatic Habermesian perspective proposed by Stein and Harper (2003). Accordingly, the main purpose of a safe space for analytical deliberation is to foster a rational, reasonable, and fair impact assessment process. In this regard, it is relevant to consider the different types of power identified by Avelino (2021): "power over" (coercion and manipulation), "power to" (resistance and empowerment), and "power with" (cooperation and learning). Hence, we maintain that one cardinal function of *SIGNificance* is to help prevent that impact assessment switches from a process based on rational argumentation (power with) to one distorted by coercive actions of the authorities and hegemonic agents (power over) or antagonistic positions of the stakeholders (power to). In the

illustration of our approach, we have shown how *SIGNificance* can be used to identify spatial patterns that are justifiable on reasonable grounds and arguments *versus* those that cannot.

A tacit assumption of analytical deliberation is the willingness of participants to engage in debates in which knowledge, information, and insights are shared to reach a compromise. In an environmental dispute, however, agreement may not be achieved despite the best facilitation. It may be the case that participants reject a reliable spatial representation that contravenes their expectations but accept one that is not logically defensible because it serves their interests. In such circumstances, we agree with Douglas (2000) on the need to resort to non-epistemic values (such as *in dubio pro natura*, namely *when in doubt, in favor of nature*) that reflect broader societal consequences beyond the possible epistemic errors in impact assessment. *SIGNificance* can then be used to constructively examine the minimum set of impacts and compare the contested "factually competent spatial representations." Sensitivity analysis can be used to determine whether the spatial representations are statistically different after considering impact prevention, mitigation, and compensation strategies. Based on the precautionary principle (Shrader-Frechette and McCoy, 1994; Lemons et al., 1997; Gullett, 1998), the final spatial representation should be the one that minimizes omission (type II) errors in rendering significant negative impacts.

Accordingly, *SIGNificance* should be viewed as a means to direct deliberation to the most important and contentious issues and concerns for the stakeholders. Given the limitations of knowledge, however, there may be instances where the stakeholders may not even consider that some important impacts were outside their scope. We argue that omitting such impacts can be explained as a consequence of ontological uncertainty (see Bojórquez-Tapia et al., 2022) in the EIA process: the ignorance of real-world entities and relationships that manifests itself in the hidden assumptions of scientific representations of environmental impacts. Paraphrasing Bromley (2008), deliberation then should let the participants work out their options as they learn what is realistic to attain—given the human tendency to prefer what seems possible to accomplish. The facilitation procedure should allow the participants to ponder the practical consequences of the different spatial representations.

One advantage of *SIGNificance* is its capacity for displaying empirically valid spatial representations that result from standardized, repeatable, and publicly verifiable geospatial data and methods. The use of *SIGNificance* contributes to a better understanding of the distribution of both environmental impacts and prevention, mitigation, and compensation measures at a project site. This understanding is fundamental for settling the unavoidable environmental disputes of socio-environmentally complex projects.

## 5. Conclusion

The analytic deliberation approach presented here concerns the difficult task of determining impact significance collaboratively of projects in dispute. In our approach, *SIGNificance* enables users to gain a better understanding of the relationships between the geographic context and the spatial distributions of impact significance in a territory. We focus on analytic deliberation as a recursive process to incorporate the knowledge and opposing perspectives of the stakeholders. Our approach combines impact significance into a single index, translates the index into understandable and accessible representations through geovisualization, and facilitates the collective construction of the meaning of impact significance. The analytic deliberation approach paired with facilitation creates a safe space for collaboration that is particularly well suited for dealing with projects in dispute characterized by scientific uncertainty, mistrust, value conflicts, and urgency. The use of *SIGNificance* simplifies the interaction with stakeholders through geovisualization, a tool designed to translate the output of geospatial analysis into understandable and accessible representations. In this way, *SIGNificance* serves as a tool for an open examination of uncertain facts



according to evidence and the reflection of the meanings of impact significance to stakeholders.

#### CRedit authorship contribution statement

**Paola Gómez-Priego:** Conceptualization, Methodology, Data curation, Writing – review & editing, Software, Validation, Formal analysis. **Luis Antonio Bojórquez-Tapia:** Conceptualization, Methodology, Writing – review & editing.

#### Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

#### Data availability

Data will be made available on request.

#### Acknowledgments

The authors acknowledge the support from PAPIIT project number IV-110118 and the UNAM-ASU Binational Laboratory of Sustainability, Vulnerability, and Adaptation to Climate Change. The authors recognize the contributions of F. Serrano-Candela and DASS for programming the *SIGNificance* user interface, and V. Hernández for formatting the figures. This article is a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor in Sustainability Science, UNAM, of Paola Gómez-Priego. Her studies were partially supported by the CONACYT scholarship 2019-000002-01NACF-12768. We recognize Juan Bremmer and Ricardo Santa Cruz for their vision and commitment to sustainable tourism demonstrated in the project that served as the basis for the illustration of our approach. We would like to express our gratitude to the editors and the anonymous reviewers for their insightful comments.

#### Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107091>.

#### References

- Abaza, H., Bisset, R., Sadler, B., 2004. *Environmental Impact Assessment and Strategic Environmental Assessment: Towards an Integrated Approach*. UNEP.
- Adger, W.N., 2006. Vulnerability. *Glob. Environ. Chang.* 16, 268–281. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006>.
- Akamani, K., Holzmueller, E.L., Groninger, J.W., 2016. Managing wicked environmental problems as complex social-ecological systems: the promise of adaptive governance. In: *Springer Geography*. Springer, pp. 741–762. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-18787-7\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-319-18787-7_33).
- Alexander, E.R., 2000. Rationality revisited: planning paradigms in a post-postmodernist perspective. *J. Plan. Educ. Res.* 19 (3), 242–256. <https://doi.org/10.1177/0739456X0001900303>.
- Antunes, P., Santos, R., Jordão, L., 2001. The application of geographical information systems to determine environmental impact significance. *Environ. Impact Assess. Rev.* 21, 511–535. [https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(01\)00090-7](https://doi.org/10.1016/S0195-9255(01)00090-7).
- Avelino, F., 2021. Theories of power and social change. Power contestations and their implications for research on social change and innovation. *J. Polit. Power* 14 (3), 505–520. <https://doi.org/10.1080/2158379X.2021.1875307>.
- Balint, P.J., Stewart, R.E., Desai, A., Walters, L.C., 2011. *Wicked Environmental Problems: Managing Uncertainty and Conflict*, 1st ed. Island Press/Center for Resource Economics. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>.
- Beinat, E., 1997. *Value Functions for Environmental Management*. Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts.
- Bernstein, B.B., Zalinski, J., 1983. An optimum sampling design and power tests for environmental biologists. *J. Environ. Manag.* 16, 35–43.
- Bojadziev, G., Bojadziev, M., 1995. *Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, Applications*. World Scientific, Singapore.
- Bojórquez-Tapia, L.A., Ongay-Delhuneau, E., 1992. International lending and resource development in Mexico: can environmental quality be assured? *Ecol. Econ.* 5, 3. [https://doi.org/10.1016/0921-8009\(92\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0921-8009(92)90001-9).

- Bojórquez-Tapia, L.A., Juárez, L., Cruz Bello, G., 2002. Integrating fuzzy logic, optimization, and GIS for ecological impact assessments. *Environ. Manag.* 30, 418–433. <https://doi.org/10.1007/s00267-002-2655-1>.
- Bojórquez-Tapia, L.A., Cruz Bello, G.M., Luna-González, L., Juárez, L., Ortiz-Pérez, M.A., 2009. V DRASTIC: using visualization to engage policymakers in groundwater vulnerability assessment. *J. Hydrol. (Amst.)* 373, 242–255. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.05.005>.
- Bojórquez-Tapia, Luis A., Eakin, Hallie, Reed, Patrick M., Miquelajaurregui, Yosune, Grave, Ileana, Merino Benítez, Tatiana, Molina Pérez, Edmundo, 2022. Unveiling uncertainties to enhance sustainability transformations in infrastructure decision-making. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 55, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.cossst.2022.101172>.
- Bond, A.J., Dockerty, T., Lovett, A., Riche, A.B., Haughton, A.J., Bohan, D.A., Sage, R.B., Shield, L.F., Finch, J.W., Turner, M.M., Karp, A., 2011. Learning how to deal with values, frames and governance in sustainability appraisal. *Reg. Stud.* 45, 1157–1170. <https://doi.org/10.1080/00343404.2010.485181>.
- Bond, A., Morrison-Saunders, A., Gunn, J.A.E., Pope, J., Retief, F., 2015. Managing uncertainty, ambiguity and ignorance in impact assessment by embedding evolutionary resilience, participatory modelling and adaptive management. *J. Environ. Manag.* 151, 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.12.030>.
- Bond, Alan, Pope, Jenny, Fundingsland, Monica, Morrison Saunders, Angus, Retief, Francois, Hauptfleisch, Morgan, 2020. Explaining the political nature of environmental impact assessment (EIA): a neo-grausian perspective. *J. Clean. Prod.* 244. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118694>.
- Briggs, S., Hutson, M.D., 2013. Determination of significance in ecological impact assessment: past change, current practice and future improvements. *Environ. Impact Assess. Rev.* 38, 16–25. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2012.04.003>.
- Bromley, Daniel W., 2008. Volitional Pragmatism. *Ecol. Econ.* 68 (1–2), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.08.012>.
- Burgess, J., Stirling, A., Clark, J., Davies, G., Eames, M., Staley, K., Williamson, S., 2007. Deliberative mapping: a novel analytic deliberative methodology to support contested science policy decisions. *Public Underst. Sci.* 16, 299–322. <https://doi.org/10.1177/0963662507077510>.
- Canter, L.W., Hill, L.G., 1979. *Handbook of Variables for Environmental Impact Assessment*. Ann Arbor Publishers, Inc.
- Cashmore, Matthew, 2004. The role of science in environmental impact assessment: process and procedure versus purpose in the development of theory. *Environ. Impact Assess. Rev.* 24 (4), 403–426. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2003.12.002>.
- Cashmore, Matthew, Richardson, Tina, Hilding-Rydevik, Tuija, Emmelin, Lars, 2010. Evaluating the effectiveness of impact assessment instruments: Theorising the nature and implications of their political constitution. *Environ. Impact Assess. Rev.* 30 (6), 371–379. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2010.01.004>.
- Clark, William C., van Kerkhoff, Lorrae, Lebel, Louis, Gallopín, Gilberto C., 2016. Crafting usable knowledge for sustainable development. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 113 (17), 4570–4578. <https://doi.org/10.1073/pnas.1601266113>.
- Cloquell-Ballester, V.-A.V.-A., Monterde-Díaz, R., Cloquell-Ballester, V.-A.V.-A., Santamarina-Siurana, M.-C., 2007. Systematic comparative and sensitivity analyses of additive and outranking techniques for supporting impact significance assessments. *Environ. Impact Assess. Rev.* 27, 62–83. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2006.08.005>.
- Couclelis, Helen, Gottsegen, Jon, 1997. What maps mean to people: denotation, connotation, and geographic visualization in land-use debates. *Spatial Inform. Theory A Theor. Basis GIS* 1329, 151–162. [https://doi.org/10.1007/3-540-63623-4\\_48](https://doi.org/10.1007/3-540-63623-4_48).
- Cox, E., 1994. *The Fuzzy Systems Handbook, a practitioner's Guide to Building, Using, and Maintaining Fuzzy Systems*. Ap Professional, Boston.
- Crowfoot, J., Wondolleck, J.M., 2012. *Environmental Disputes: Community Involvement in Conflict Resolution*. Island Press.
- Dee, N., Baker, J., Drobny, N., Duke, K., Whitman, I., Fahringer, D., 1973. An environmental evaluation system for water resource planning. *Water Resour. Res.* 9, 523–535.
- Dehaene, S., 2003. The neural basis of the weber-Fechner law: a logarithmic mental number line. *Trends Cogn. Sci.* 7, 145–147. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(03\)00055-X](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(03)00055-X).
- Dietz, T., 2013. Bringing values and deliberation to science communication. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 110, 14081–14087. <https://doi.org/10.1073/pnas.1212740110>.
- Dietz, T., Stern, P.C., 1998. Science, values, and biodiversity. *Bioscience* (June), 441–444.
- Douglas, Heather, 2000. Inductive risk and values in science. *Philos. Sci.* 67 (4), 559–579. <https://doi.org/10.1086/392855>.
- Douglas, Heather, 2008. The role of values in expert reasoning. *Public Aff. Q.* 22 (1), 1–18.
- Duinker, P.N., Beanlands, G.E., 1986. The significance of environmental impacts: an exploration of the concept. *Environ. Manag.* 10, 1–10. <https://doi.org/10.1007/BF01866412>.
- Duncan, S.L., Lach, D.H., 2006. Privileged knowledge and social change: effects on different participants of using geographic information systems technology in natural resource management. *Environ. Manag.* 38, 267–285. <https://doi.org/10.1007/s00267-005-0162-x>.
- Eakin, H., Luers, A.L., 2006. Assessing the vulnerability of social environmental systems. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 31, 365–394. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.30.050504.144352>.
- Eckerd, A., 2017. Citizen language and administrative response: participation in environmental impact assessment. *Adm. Soc.* 49, 348–373. <https://doi.org/10.1177/0095399714548272>.

- Ehrlich, A., Ross, W., 2015. The significance spectrum and EIA significance determinations. *Impact Assess. Project Apprais.* 33, 87–97. <https://doi.org/10.1080/14615517.2014.981023>.
- Elling, Bo, 2009. Rationality and effectiveness: does EIA/SEA treat them as synonyms? *Impact Assess. Project Apprais.* 27 (2), 121–131. <https://doi.org/10.3152/146155109X454294>.
- Enriquez de Salamanca, Álvaro, 2018. Stakeholders' manipulation of environmental impact assessment. *Environ. Impact Assess. Rev.* 68 (October 2017), 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2017.10.003>.
- Flyvbjerg, B., 1996. The dark side of planning: rationality and "rearrationalitat". In: Mandelbaum, S., Mazza, L., Burchell, R. (Eds.), *Explorations in Planningtheory. Center for Urban Policy Research, Rutgers University, New Brunswick, NJ*.
- Fornby, John, 1990. The politics of environmental impact assessment. *Impact Assess.* 8 (1–2), 191–196. <https://doi.org/10.1080/07349165.1990.9726037>.
- Gullett, Warwick, 1998. Environmental impact assessment and the precautionary principle: legislating caution in environmental protection. *Aust. J. Environ. Manag.* 5 (3), 146–158. <https://doi.org/10.1080/14486563.1998.10648411>.
- Gunderson, R., 2018. Global environmental governance should be participatory: five problems of scale. *Int. Sociol.* 33, 715–737. <https://doi.org/10.1177/0268580918792786>.
- Gutiérrez, E.M., 2019. El llamado Nuevo Cancún va, afirma Alfaro Ramírez. Milenio.
- Hartley, N., Wood, C., 2005. Public participation in environmental impact assessment—implementing the Aarhus convention. *Environ. Impact Assess. Rev.* 25, 319–340. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2004.12.002>.
- Ijäs, A., Kuitunen, M.T., Jalava, K., 2010. Developing the RIAM method (rapid impact assessment matrix) in the context of impact significance assessment. *Environ. Impact Assess. Rev.* 30, 82–89. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2009.05.009>.
- Innes, J.E., Booher, D.E., 1999. Consensus building and complex adaptive systems: a framework for evaluating collaborative planning. *J. Am. Plan. Assoc.* 65, 412–423. <https://doi.org/10.1080/01943369908976071>.
- Innes, J.E., Booher, D.E., 2010. *Planning with Complexity, Planning with Complexity: An Introduction to Collaborative Rationality for Public Policy*. Routledge, New York. <https://doi.org/10.4324/97802038864302>.
- Kontic, B., 2000. Why are some experts more credible than others? *Environ. Impact Assess. Rev.* 20, 427–434. [https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(00\)00057-3](https://doi.org/10.1016/S0195-9255(00)00057-3).
- Kosko, B., 1992. *Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence*. Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Lawrence, D.P., 2003. *Environmental Impact Assessment. Practical Solutions to Recurrent Problems*. John Wiley & Sons, Inc.
- Lawrence, D.P., 2007a. Impact significance determination—pushing the boundaries. *Environ. Impact Assess. Rev.* 27, 770–788. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2007.02.010>.
- Lawrence, D.P., 2007b. Impact significance determination—designing an approach. *Environ. Impact Assess. Rev.* <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2007.02.012>.
- Lemons, John, Shrader-Frechette, Kristin, Cranor, Carl, Shrader, Kristin, Carnor, Carl, 1997. The precautionary principle: scientific uncertainty and type I and type II errors. *Found. Sci.* 2 (2), 207–236. <https://doi.org/10.1023/A:1009611419680>.
- Loomis, John J., Dziedzic, Mauricio, 2018. Evaluating EIA systems' effectiveness: a state of the art. *Environ. Impact Assess. Rev.* 68 (November 2016), 29–37.
- Loomis, John J., Bond, Alan, Dziedzic, Mauricio, 2022. Transformative effectiveness: how EIA can transform stakeholders' frames of reference. *Environ. Sci. Pol.* 136 (October 2021), 207–215. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.06.007>.
- Lootsma, F., 1999. *Multi-Criteria Decision Analysis Via Ratio and Difference Judgement*. Springer, US.
- Malczewski, J., Rinner, C., 2015. *Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science, Advances in Geographic Information Science*. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74757-4>.
- McGoey, Linsey, 2007. On the will to ignorance in bureaucracy. *Econ. Soc.* 36 (2), 212–235. <https://doi.org/10.1080/03085140701254282>.
- McGoey, Linsey, 2012. Strategic unknowns: towards a sociology of ignorance. *Econ. Soc.* 41 (1), 1–16. <https://doi.org/10.1080/03085147.2011.637330>.
- Miller, G., 1956. The magic number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *Psychol. Rev.* 63, 81–97.
- Morgan, Richard K., 2012. Environmental impact assessment: the state of the art. *Impact Assess. Project Apprais.* 30 (1), 5–14. <https://doi.org/10.1080/14615517.2012.661557>.
- Musters, C.J.M., de Graaf, H.J., ter Keurs, W.J., 1998. Defining socio-environmental systems for sustainable development. *Ecol. Econ.* 26, 243–258. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(97\)00104-3](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(97)00104-3).
- National Research Council, 1996. *Understanding Risk: Informing Decisions in a Democratic Society, Understanding Risk*. The National Academies Press, Washington, DC. <https://doi.org/10.17226/5138>.
- Pavlickova, K., Vyskupova, M., 2015. A method proposal for cumulative environmental impact assessment based on the landscape vulnerability evaluation. *Environ. Impact Assess. Rev.* 50, 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2014.08.011>.
- Petts, J., 1999. *Handbook of Environmental Impact Assessment, Vol. 2*. Blackwell Science.
- Petts, J., 2003. Barriers to deliberative participation in EIA: learning from waste policies, plans, and projects. *J. Environ. Assess. Policy Manag.* 05, 269–293. <https://doi.org/10.1142/S1464333203001358>.
- Regan, H.M., Colyvan, M., Burgman, M.A., 2008. A taxonomy and treatment of uncertainty for ecology and conservation biology. *Ecol. Appl.* 12, 618–628. <https://doi.org/10.2307/3060967>.
- Saaty, T.L., Vargas, I.G., 2012. The seven pillars of the analytic hierarchy process. In: *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*. Springer Science & Business Media, pp. 23–40. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3597-6>.
- Shrader-Frechette, K.S., McCoy, E.D., 1994. Biodiversity, biological uncertainty, and setting conservation priorities. *Biol. Philos.* 9, 167–195. <https://doi.org/10.1007/BF00857931>.
- Sidaway, R., 2005. *Resolving Environmental Disputes*. Cromwell Press Ltd, Trowbridge.
- Sippe, R., 1999. Criteria and standards for assessing significant impact. In: Petts, J. (Ed.), *Handbook of Environmental Impact Assessment, Vol. 1*. Blackwell Science, London, pp. 74–92.
- Stein, Stanley M., Harper, Thomas L., 2003. Power, trust, and planning. *J. Plan. Educ. Res.* 23 (2), 125–139. <https://doi.org/10.1177/0739456X03258636>.
- Terano, T., Asai, K., Sugeno, M., 1989. *Applied Fuzzy Systems*. Academic Press, Boston.
- United Nations Environment Program, 1999. *Studies of EIA practice in developing countries*. In: McCabe, M., Sadler, B. (Eds.), *Division of Technology, Industry and Economics Economics and Trade Branch*.
- United Nations Environment Program, 2018. *Assessing Environmental Impacts - a Global Review of Legislation*. Nairobi, Kenya.
- United States Department of Agriculture - Agricultural Research Service, 2014. *Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) - Welcome to RUSLE 1 and RUSLE 2*.
- Villanueva Sánchez, R., Aguilar, C., de los Huizar, M.A., 2018. Chalacatepec "el nuevo Cancún en Jalisco": ¿se repiten las falsas expectativas locales? (México). *Extremadura. Revista de Historia Volumen X*, 8–24.
- Wanderer, T., Herle, S., 2015. Creating a spatial multi-criteria decision support system for energy related integrated environmental impact assessment. *Environ. Impact Assess. Rev.* 52, 2–8. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2014.09.002>.
- Weston, J., 2004. EIA in a risk society. *J. Environ. Plan. Manag.* 47, 313–325. <https://doi.org/10.1080/0964056042000209058>.
- Wilkins, H., 2003. The need for subjectivity in EIA: discourse as a tool for sustainable development. *Environ. Impact Assess. Rev.* 23, 401–414. [https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(03\)00044-1](https://doi.org/10.1016/S0195-9255(03)00044-1).
- Wood, G., 2008. Thresholds and criteria for evaluating and communicating impact significance in environmental statements: "See no evil, hear no evil, speak no evil"? *Environ. Impact Assess. Rev.* 28, 22–38. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2007.03.003>.
- Wood, C., 2014. *Environmental Impact Assessment: A Comparative Review, 2nd ed.* Routledge.
- Wood, G., Rodríguez-Bachiller, A., Becker, J., 2007. Fuzzy sets and simulated environmental change: evaluating and communicating impact significance in environmental impact assessment. *Environ. Plan. A* 39, 810–829. <https://doi.org/10.1068/a3878>.



#### **4. Artículo en revisión: What is evidence of environmental damage? Navigating expert judgment uncertainty**

Paola Gómez-Priego,<sup>a</sup> Luis A. Bojórquez-Tapia,<sup>a</sup> César A. Domínguez,<sup>a</sup> Ana E. Escalante<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad, Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México

##### **Abstract**

We introduce a novel approach designed to navigate the inherent uncertainty surrounding expert judgment regarding environmental tort claims and the subsequent adjudication process, particularly in cases involving large-scale infrastructure investments. Our proposed methodology provides a systematic framework to address the challenges that arise when evaluating conflicting expert judgments in post-event environmental impact assessments (PEEIA). This approach is grounded in abductive reasoning, also known as inference to the best explanation, and is implemented through a formal counterfactual inference procedure. The primary objective of this procedure is to assess whether expert judgment possesses the required quality to substantiate a specific belief regarding the liability of the alleged tortfeasor. Operationally, this procedure integrates axiomatization and decision theory techniques, including Weight of Evidence (WoE), Clairvoyance Analysis (CA), and inductive risk.

To illustrate the effectiveness of our approach, we provide a fictitious example derived from real cases of mine spills in public watercourses. Through this example, we demonstrate the practical application of abductive reasoning and counterfactual inference for accurately determining the environmental impacts and assigning liability in the context of large-scale infrastructure investments. Furthermore, our illustrative example underscores the importance of employing a formal procedure to successfully navigate the intricate and contentious landscape commonly encountered in PEEIA.

**Keywords:** Decision processes, Weight of Evidence, Clairvoyance Analysis, Environmental tort, AHP/ANP

## 1. Introduction

Large-scale infrastructure investments from governments, multilateral lending institutions, and the private sector are being challenged by environmental tort claims, particularly in countries with economies in transition. In Mexico, for example, a rising number of tort claims are being filed by grassroots citizens and non-governmental organizations in the pursuit of environmental justice. Some emblematic cases involve high scientific uncertainty and thus have been adjudicated by the Mexican Supreme Court using the principles of *in dubio pro natura* (when in doubt, nature), *in dubio pro aqua* (when in doubt, water), and *propter rem* (ecological function of property). In this context, post-event environmental impact assessments (PEEIA) are typically requested by the courts to ascertain the available evidence of environmental damage allegedly caused by tortious conduct. PEEIA is a retrospective approach largely based on expert judgment. Hence, one primary question in environmental litigation concerns the extent to which the courts should rely on such judgments about the truth of environmental tort claims.

Expert judgment can be nevertheless problematic for several reasons. It can be defined as a skilled opinion regarding possible causal mechanisms or pathways linking evidence of environmental damage to the alleged tortious conduct. When environmental torts involve complex systems of largely unknown structure and composition, the causal mechanisms have to be conjectured based on the available evidence (Bunge, 2004; Craver & Tabery, 2019), which may include conflicting information from multiple sources (databases, testimony, or sampling). In addition, training and experience largely determine expert judgment (Douglas, 2008; Lemons et al., 1997). Also, specialists and scientists often tend to follow narrow disciplinary lines of thought and are susceptible to confirmation bias (Nickerson, 1998) by being unconsciously selective in the choice of methodology and data. In consequence, expert judgment is invariably embedded in epistemic and linguistic uncertainty (Balint et al., 2011; Carey and Burgman, 2008; Kwakkel et al., 2010; Regan et al., 2008).

From a legal perspective, PEEIA requires a method for incorporating the inherent uncertainty of expert judgment into the rules of evidence and judicial procedure. Among other things, expert judgment should provide elements for establishing the divergence of a conjectured causal mechanism from what would presumably be an undisputed fact in a court of law, the soundness of the rebuttable legal presumptions, and the burden of proof (Cranor, 2004; Crawford-Brown & Crawford-Brown, 2011; Foster, 2011; Gullett, 1998; Lin, 2004). In other



words, such a method should establish whether expert judgment is good enough to justify a particular belief about the tortfeasor's liability.

From a methodological perspective, expert judgment can be formulated as a falsifiable hypothesis  $H: C \rightarrow M \rightarrow E$ , representing a causal chain where the likely mechanism,  $M$ , which encompasses the course of events or pathway, links the evidence of environmental damage,  $E$ , to the tortious conduct or cause,  $C$ . While the legal premises of an alleged tortious conduct ( $C \rightarrow E$ ) are typically well established, a comprehensive description of causation ( $C \rightarrow M \rightarrow E$ ) often encounters semantic ambiguities and potential questioning (Sheng et al., 2015). When confronted with various forms of uncertainty, it is important to acknowledge that any statistical inference test applied to hypothesis  $H$  inherently involves an "inductive risk." This refers to the probability of incorrectly accepting or rejecting the hypothesis based on the available evidence. Inductive risk implies the consideration of epistemic (knowledge-related) and non-epistemic (value-related) judgments associated with the potential for erroneous acceptance or rejection of a hypothesis (Biddle, 2016; Douglas, 2000). In the adjudication of environmental torts, the integration of inductive risk assumes paramount importance within the court system. Consequently, there is a pressing need to develop approaches that effectively tackle the challenges associated with evaluating the value of expert judgment in establishing the truth of environmental tort claims.

In this paper, we present a rigorous and systematic for drawing legal inferences from hypotheses put forth by experts in the context of PEEIA fraught with uncertainties. To demonstrate the effectiveness of our approach, we provide an illustrative example based on real cases of mine spills in public watercourses. Our approach is based on abductive reasoning and employs counterfactual inference to ascertain the validity of claims relating evidence of environmental damage and an alleged tortious conduct. Abductive reasoning is a form of logical inference, also known as "inference to the best explanation." Counterfactual analysis uses logical conditionals of the form "If A had not occurred, C would not have occurred" to establish causality (Bromley, 2008; Lewis, 2000; Menzies, 2017).

Operationally, our approach involves four components. First, we employ axiomatization, a method for subjecting intuitive thinking to logical and factual scientific explanations (Bunge, 2017). This helps establish a solid foundation for our reasoning process. Second, we utilize the Weight of Evidence (WoE) technique, which is a Bayesian method used to update prior

information based on available evidence. WoE enables the quantitative assessment of the strength of the evidence supporting each hypothesis. Third, we employ clairvoyance analysis (CA), a method derived from the theory of information value (Good, 2002; Howard, 1966). CA evaluates the worth and reliability of expert judgment, providing insights into the quality and credibility of the proposed hypotheses. Fourth, we consider the inductive risk associated with each hypothesis to minimize the potential for error when determining the relationship between the evidence of environmental damage and the liability of the tortfeasor. This consideration helps establishing the level of reliability of the hypotheses. By integrating these operational components, our approach provides a robust framework for evaluating expert judgment and generating reliable insights into the causal links between environmental damage and alleged tortious conduct.

## **2. Background**

### **2.1 Causation**

Causation in law concerns the extent and the grounds of responsibility. The extent of responsibility pertains to the question of whether the misconduct constitutes the “proximate cause” of harm. This determination relies on dismissing the possibility that other causes could preempt or supersede the alleged tortious conduct, that the damage dissipates and decreases over time, and that the damage does not exceed the level that would have occurred without the tortious conduct. The grounds of responsibility involve establishing the factual causation that links the alleged conduct to the harm inflicted upon various components such as flora, fauna, soil, water, landscapes, or ecological interrelationships.

Nevertheless, the process of conjecturing causation is not devoid of challenges. One particular difficulty stems from the fact that the same evidence can potentially support different incompatible causal mechanisms. This situation is referred as underdetermination by evidence (Stanford, 2017; Woodward, 2016; Worrall, 2009). Conversely, there are instances where a single observed effect is the result of multiple independent causal factors, a phenomenon known as overdetermination of causes (West, 2006).

The presence of both overdetermination and underdetermination underscores the importance of representing causation as falsifiable hypotheses. The key concern lies in identifying the

entities, activities, and structural features of mechanisms that are considered relevant and those that are deemed irrelevant in terms of their causal influence (Craver & Tabery, 2019).

## 2.2 Inductive risk

In hypothesis testing (Table 1), there are two ways of being right and two ways of being wrong in accepting or rejecting the hypothesis  $H: C \rightarrow M \rightarrow E$  (Burtis et al., 2017):

- (1) Correctly accepting  $H$  when  $M \rightarrow E$  is true, in which case its probability is the sensitivity or true positive rate ( $TPR$ ).
- (2) Correctly rejecting  $H$  when  $M \rightarrow E$  is false, in which case its probability is the specificity or true negative rate ( $TNR$ ).
- (3) Incorrectly accepting  $H$  when  $E$  or  $M$  is false, in which case its probability is the type-I error or false positive rate ( $FPR$ ).
- (4) Incorrectly rejecting  $H$  when  $E$  or  $M$  is true, in which case its probability is the type-II error or false negative rate ( $FNR$ ).

Inductive risk, a term coined by Hempel (1965), refers to the probability of incorrectly accepting or rejecting a hypothesis, commonly known as type-I and type-II errors, respectively. It involves considering confirmation and acceptance rules (Biddle, 2016; Douglas, 2000).

Confirmation rules concern whether the evidence  $E$  is enough to warrant the acceptance or rejection of the hypothesis  $H$ . This determination is contingent upon the potential consequences of making an erroneous decision and, thus, a higher degree of confirmation should be demanded when the environmental damages at stake are substantial.

Rules of acceptance encompass the level of robustness required for evidence  $E$  to justify the acceptance of hypothesis  $H$ . This determination considers broader societal consequences beyond statistical or epistemic errors. They incorporate ethical, non-epistemic factors as legitimate considerations in deciding whether to accept or reject  $H$ . For example, the principle of *in dubio pro natura* can be applied to minimize the possibility of inadequate compensation for the cost imposed on society by tortious conduct. By applying this principle, the focus is placed on erring on the side of caution and taking into account the long-term and indirect consequences of tortious conduct. This ensures that potential costs and damages are neither underestimated nor neglected.

**Table 1. Hypothesis testing matrix in environmental tort cases**

Expert judgment Environmental harm	Evidence	
	True	False
True	Sensitivity (TPR)	False positive (Type I error; FPR)
False	False negative (Type II error; FNR)	Specificity (TNR)

TPR=true positive rate; TNR=true negative rate;  
FPR=false positive rate; FNR=false negative rate

### 2.3 Abductive reasoning

Abductive reasoning, also known as “inference to the best explanation,” is a logical process to find the simplest and most likely conclusion based on incomplete information and uncertainty (Bromley, 2008). It entails working backward from observed evidence to generate hypotheses about the cause of an event. The objective is to provide an explanation for the event’s cause, even if the explanation remains conjectural and fallible (Ansell & Boin, 2017). The process involves evaluating a set of hypotheses or conjectures regarding the liability of an agent and selecting the one that constitutes the best justification for believing in the existence of a causal effect (Lipton, 2017). Abductive reasoning is particularly valuable in situations characterized by uncertainty and the challenges of underdetermination and overdetermination (Behfar & Okhuysen, 2018). These challenges arise when the available evidence does not conclusively determine a single explanatory mechanism, or multiple mechanisms may potentially account for the observed phenomenon.

Within the context of a PEEIA, the application of abductive reasoning involves identifying the best *bona fide* explanatory mechanism that connects *prima facie* evidence of environmental damage to tortious conduct. Abductive reasoning operates under the assumption that, when presented with a collection of potential hypotheses regarding tortious conduct,  $\{H_i | H_1, H_2, \dots, H_n\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , and a corresponding set of explanatory mechanisms,  $\{M_i | M_1, M_2, \dots, M_n\}$ , if  $H_i$  utilizing  $M_i$  offers a more comprehensive explanation of the evidence  $E$  than  $H_j, H_k, \dots, H_n$ , then  $H_i$  is considered to be closer to the truth than  $H_j, H_k, \dots, H_n$ , where  $i \neq j, k, \dots, n$

### 2.4 Counterfactual inference

Factual causation necessitates the use of counterfactual inference to identify the causally relevant mechanism among a set of possible scientific explanations (Lewis, 2000). Counterfactual inference involves stating that *If C* (the putative cause) had not occurred, *then E* (the effect) would not have occurred. It involves examining whether, when, and how one event occurs in relation to whether, when, and how another event occurs (Menzies, 2017).

In the context of PEEIA, two counterfactual inference tests drawn from legal causation theories can be applied (Menzies, 2017; Moore, 2019): causal minimalism and the Necessary Element of a Sufficient Set (NESS). Causal minimalism, also known as the *but-for* (had it not been for) test, focuses on determining whether the tortfeasor's actions (or inactions) are a *conditio sine qua non* (independently sufficient) for the observed environmental harm. For instance, the claim that *but-for the spill resulting from negligence by the mine, environmental damage would not have occurred*, asserts that the spill is the *cause-in-fact* (or necessary condition) and that it can be proven that environmental damage results from the spill (or sufficient condition). The advantage of the but-for test lies in its objectivity and transparency, as it provides a basis for definitive adjudication. It is applicable in cases where there is no possibility of overdetermination. However, establishing the cause-in-fact can be challenging whenever environmental damage may be overdetermined and other antecedent actual conditions may preempt the spill itself from being a sufficient condition for explaining the alleged environmental damage.

The NESS is used to consider the degree of causal contribution when multiple factors combine to produce harm, none of which is individually necessary or sufficient (Beltrán, 2014; West, 2006; Wright, 2011). A necessary element is a causally relevant condition when it, together with the set of other factors, is sufficient for a harmful outcome. In cases involving tortious conduct, such as negligence by the mine resulting in a spill, the spill is considered a causally relevant condition *if and only if the toxic acidic solution is a necessary element in a set of actual antecedent conditions (e.g., water transport of the toxic acidic solution, exposure of sensitive environmental elements along the watercourse, disease, and drought) that are jointly sufficient for the occurrence of environmental damage*.

### **3. Method**

Abductive reasoning entails the implementation of formal procedure of counterfactual inference to identify the hypothesis,  $H_i$ , that best explains the evidence of environmental damage.

This is accomplished by considering a set of hypotheses,  $\{H_i|H_1, H_2, \dots, H_n\}$ , which includes all possible alternative explanations derived from counterfactual inference. This abductive reasoning procedure consists of two steps, axiomatization and inference, which are explained in detail below.

### 3.1 Axiomatization

The implementation of the approach begins with the axiomatization of the candidate hypotheses and causal mechanisms linking the alleged causal agent and the observed environmental damage. Axiomatization is a formal method to delineate the content of scientific explanations whose status is conjectural. Its primary objective is to foster a logical and fact-based rationale while circumventing the utilization of intuitive or heuristic formulations of causal theories that could inadvertently incorporate erroneous or false assumptions (Bunge, 2001, 2017). Essentially, axiomatic reasoning supplants intuitive constructs with concrete system-based explanatory mechanisms (Bunge, 2000, 2004). Therefore, scientifically valid beliefs regarding the truth of a hypothesis  $H_i$  are expressed in terms of a specific mechanism-based explanation,  $M_i$ .

In our approach, axiomatization serves as a fundamental analytical tool with several key purposes. It aids in organizing cause-effect propositions, providing justifications for postulates, and revealing hidden assumptions underlying hypotheses set  $\{H_i|H_1, H_2, \dots, H_n\}$ . Each hypothesis  $H_i$  is expressed using axioms (obvious initial assumptions that require no proof), definitions (propositions concerning the state of socio-environmental variables), and theorems (falsifiable propositions deduced from the axioms and definitions that describe a sequence of events). In the context of PEEIA, axioms correspond to non-rebuttable legal presumptions, definitions characterize depict systemic relations, and theorems take shape as rebuttable legal presumptions. Together, axioms, definitions and theorems constitute an explanatory hypothesis formally linking the cause and the evidence through a specific mechanism,  $H_i: C_i \rightarrow M_i \rightarrow E_i$ .

### 3.2 Inference

Inference involves applying WoE and CA to evaluate and compare each hypothesis in the set  $\{H_i|H_1, H_2, \dots, H_n\}$  and determine the one that provides the best explanation for the evidence of environmental damage. This process is elaborated below.

WoE is ubiquitous in the decision-making literature. It concerns the integration of evidence and expert judgment into inferences and probabilities pertaining to whether a given conclusion is right or wrong (Good, 1988, 1991; Weed, 2005). It has been applied in environmental risk assessments across various spatial and temporal scales, proving valuable in mitigating biases, enhancing the accuracy of conclusions, and improving decision-making under high uncertainty (Burton et al., 2002; Lowell et al., 2000; Suter & Cormier, 2011). WoE entails the adoption of Bayesian modeling to quantify the shift from the *prior* belief regarding a hypothesis to the *posterior* belief after considering the available evidence and causal mechanism. Generally, WoE is represented as a monotonic function of the  $\log_{10}$  of the Bayes factor (Good, 1988; Linkov et al., 2009; Weed, 2005). In our specific case, the Bayes factor is used to calculate the odds of correctly establishing the linkage between evidence and the causal agent via a given mechanism; formally:

$$W(H|E\&M) = \log_{10} \left( \frac{Pr(H|E\&M)Pr(\neg H)}{Pr(\neg H|E\&M)Pr(H)} \right)$$

where  $Pr(H)$  is the prior probability,  $\neg H$  is the negation of  $H$ ,  $Pr(\neg H) = 1 - Pr(H)$ ,  $Pr(H|E\&M)$  is the probability  $E$  is true if  $H$  and  $M$  are true, and  $Pr(E|\neg H\&M)$  is the probability of evidence  $E$  if  $H$  and  $M$  are false.

To operationalize WoE within our framework, we introduce two key concepts: *confidence* and *plausibility*. The matrix form of the Bayes theorem (Saaty & Vargas, 1998) is used in this operationalization. Let confidence denote the prior belief regarding a causal claim and be represented by a  $2 \times 1$  column stochastic vector (i.e., column sum 1):

$$\mathbf{P}(\Theta)^T = [Pr(H), Pr(\neg H)]$$

where  $\neg H$  is the negation of  $H$ ,  $Pr(\neg H) = 1 - Pr(H)$ .

Let plausibility denote the likelihood, or the belief in the truthfulness of  $E$  given  $H$  and  $M$ , and be represented by a  $2 \times 2$  column stochastic matrix:

$$\mathbf{P}(\mathbf{X}|\Theta) = \begin{bmatrix} Pr(E|H\&M) & Pr(\neg E|H\&M) \\ Pr(\neg E|\neg H\&M) & Pr(E|\neg H\&M) \end{bmatrix}$$

where  $Pr(E|H\&M)$  is the likelihood of  $E$  given  $H$  and  $M$ , and  $Pr(\neg E|\neg H\&M) = 1 - Pr(E|\neg H\&M)$ .

Let the conditional probabilities be represented by a  $2 \times 1$  column stochastic vector:

$$\mathbf{P}(\mathbf{X}) = \mathbf{P}(\mathbf{X}|\Theta)\mathbf{P}(\Theta) = \begin{bmatrix} Pr(E|H\&M) & Pr(E|\neg H\&M) \\ Pr(E|\neg H\&M) & Pr(E|H\&M) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Pr(H) \\ Pr(\neg H) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Pr(X_{11}) \\ Pr(X_{21}) \end{bmatrix}$$

The matrix form of the Bayes theorem generates a  $2 \times 2$  column stochastic matrix of posterior probabilities:

$$\mathbf{P}(\Theta|\mathbf{X}) = \Delta\mathbf{P}(\Theta)\mathbf{P}(\mathbf{X}|\Theta)\Delta\mathbf{P}(\mathbf{X})^{-1}$$

where

$$\Delta\mathbf{P}(\Theta) = \begin{bmatrix} Pr(H) & 0 \\ 0 & Pr(\neg H) \end{bmatrix}$$

$$\Delta\mathbf{P}(\mathbf{X})^{-1} = \begin{bmatrix} 1/Pr(X_{11}) & 0 \\ 0 & 1/Pr(X_{21}) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{P}(\Theta|\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} Pr(H|E\&M) & Pr(H|\neg E\&M) \\ Pr(\neg H|E\&M) & Pr(\neg H|\neg E\&M) \end{bmatrix}$$

where  $Pr(H|E\&M)$  is sensitivity or *TPR*,  $Pr(\neg H|\neg E\&M)$  is specificity or *TNR*,  $Pr(H|\neg E\&M)$  is type-I error or *FPR*, and  $Pr(\neg H|E\&M)$  is type-II error or *FNR*; see Table 1 .

Confidence and plausibility can be understood as expressions that capture the inherent uncertainty associated with making inferences about causal claims. From a Bayesian modeling perspective, they correspond to subjective probabilities that quantify the belief regarding the association between the causal agent and environmental harm. It is important to note that subjective probabilities are influenced not only by the available evidence but also by the knowledge and information at hand. Consequently, the process of eliciting these probabilities inevitably involves certain *degree of vagueness* (Good, 1988) that arises from the ambiguous and polysemous nature of linguistic expressions typically used by experts to convey uncertainty (M. G. Morgan, 2014).

Drawing from Wallsten et al. (1986), we employ a *degree of belief* linguistic scale to account for the uncertainty of evidence and the vagueness of expert judgment (Table 2). This linguistic scale serves as a representation of how experts psychologically convey the relative strength of their beliefs. Each linguistic variable (Zadeh, 1975) offers an approximate characterization of a complex, uncertain, and ill-defined causality that cannot be precisely described quantitatively. To



transform these linguistic variables into subjective probabilities, we used the reciprocal matrix method. This method involves solving the principal eigenvector of a  $n \times n$  reciprocal matrix of verbal probabilistic expressions associated with a numerical scale (Hughes, 1993; Jensen, 1981; Tavana et al., 1997; Yager, 1979). Operationally, this transformation is achieved by means of Saaty's (1980) Analytic Hierarchy Process (AHP). Since the *degree of belief* linguistic scale corresponds to the "fundamental scale" of the AHP (Table 2), the deviation of a linguistic expression relative to randomness is associated with the respective  $\alpha$  value for the  $2 \times 2$  reciprocal matrix **A**:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & \alpha \\ 1/\alpha & 1 \end{bmatrix}$$

By solving for the principal eigenvector of matrix **A**, we obtain the subjective probabilities for confidence,  $\mathbf{P}(\Theta)^T = [Pr(H), Pr(\neg H)]$ , and plausibility,  $\mathbf{P}(\mathbf{X}|\Theta)^T = [Pr(E|H\&M), Pr(E|\neg H\&M)]$ .

**Table 2. Subjective probabilities ( $Pr(\alpha)$ ) of confidence and plausibility for their respective linguistic variables.**

Linguistic variable				AHP	
Wallsten	Confidence	Plausibility	Fundamental scale	$\alpha$	$Pr(\alpha)$
Almost impossible	Inconspicuous	Inconclusive	Extremely less	1/9	0.10
				1/8	0.11
Doubtful	Scintilla	Unfounded	Very strongly less	1/7	0.13
				1/6	0.14
Improbable	Suspicious	Speculative	Strongly less	1/5	0.17
				1/4	0.20
Unlikely	Ambiguous	Problematic	Moderately less	1/3	0.25
				1/2	0.33
Tossup	Random (accidental, by chance)		Equal	1	0.50
				2	0.67
Possible	Substantial	Conceivable	Moderately more	3	0.75
				4	0.80
Good chance	Unequivocal	Convincing	Strongly more	5	0.83
				6	0.86
Probable	Preponderant	Well-founded	Very strongly more	7	0.88
				8	0.89
Almost certain	Beyond doubt	Conclusive	Extremely more	9	0.90

CA provides a benchmark for ascertaining the information value or worth of expert judgment in abductive reasoning. The worth of a “clairvoyant” or expert is closely tied to his/her capacity for enhance expectations regarding future events, such as achieving a fair adjudication (Howard, 1966; Mock, 1971). Because CA is related to the concept of inducive risk, we define clairvoyance as the information value or worth of expert judgment,  $IV(H|E\&M)$ , in relation to type-I and type-II errors. Thus, the expected clairvoyance is determined by the difference between the false positive rate and the false negative rate ( $FPR - FNR$ ), expressed formally as:

$$IV(H|E\&M) = \frac{(FPR - FNR)W(H|E\&M)}{\max((FPR - FNR)W(H|E\&M))}$$

where the denominator corresponds to what would presumably be an undisputed fact in a court of law and normalizes the expected clairvoyance within the range  $[-1,1]$ .

The resulting normalized range,  $-1 \leq IV(H|E\&M) \leq 1$ , is interpreted as a gradient of clairvoyance, ranging from *clarity* to *opacity*, with randomness serving as the reference point

( $Pr(H) = Pr(E|H\&M) = 0.5, IV(H|E\&M) = 0$ ). Clarity indicates a tendency toward perfect clairvoyance,  $IV(H|E\&M) \rightarrow 1$ , in which case:

(1) Accept  $H$  due to  $W(H|E\&M) > 0$  (odds in favor  $H$ ).

(2) Reject  $H$  due to  $W(H|E\&M) < 0$  (odds against  $H$ )

Opacity indicates a tendency toward imperfect clairvoyance,  $IV(H|E\&M) \rightarrow -1$ , in which case:

(3) Reject  $H$  due to  $W(H|E\&M) < 0$  (odds against  $H$ ) and a high type-I error ( $FPR > FNR$ ).

(4) Reject  $H$  due to  $W(H|E\&M) > 0$  (odds in favor  $H$ ) but a high a type-II error ( $FPR < FNR$ ).

Graphically, the clairvoyance gradient is visualized as a 3D surface (Figure 1). Clarity in accepting  $H$  corresponds to the region of the 3D surface characterized by high confidence ( $Pr(H) > 0.5$ ) and high plausibility ( $Pr(E|H\&M) > 0.5$ ). Clarity in rejecting  $H$  corresponds to the region characterized by low confidence ( $Pr(H) < 0.5$ ) and low plausibility ( $Pr(E|H\&M) < 0.5$ ). Opacity, on the other hand, corresponds to the region characterized by high confidence ( $Pr(H) > 0.5$ ) and low plausibility ( $Pr(E|H\&M) < 0.5$ ), or by low confidence ( $Pr(H) < 0.5$ ) and high plausibility ( $Pr(E|H\&M) > 0.5$ ). Furthermore, *ignorance* indicates the tendency toward lack of clairvoyance,  $IV(H|E\&M) \rightarrow 0$ , that is, that expert knowledge holds no value for adjudication regarding  $H$ . Ignorance arises when there is total uncertainty or randomness present.

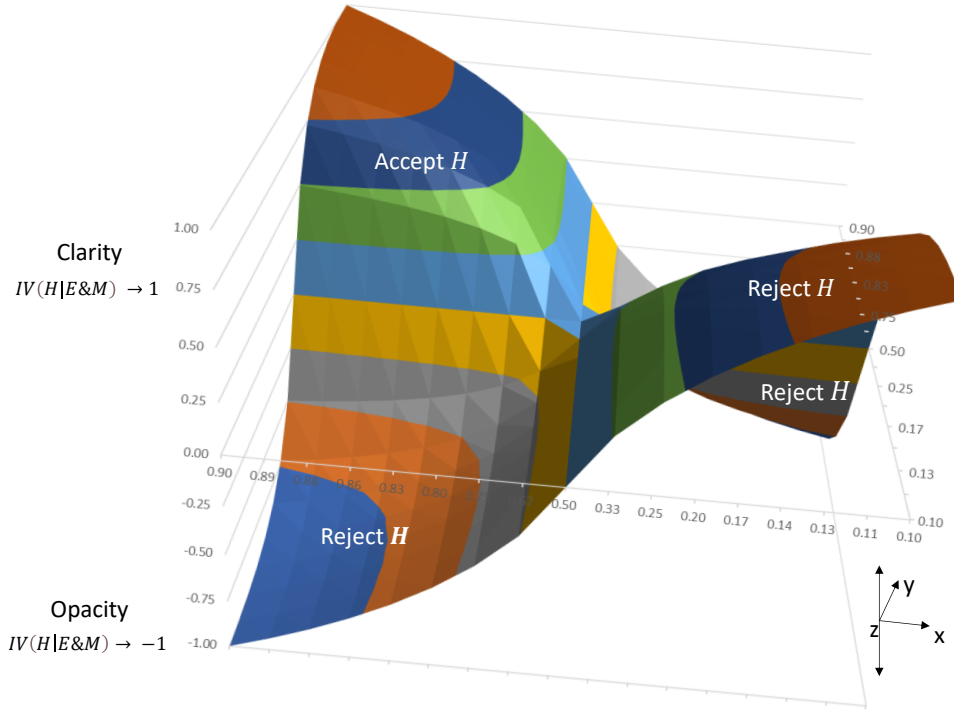


Figure 1. Graphical representation of clairvoyance analysis; x-axis= confidence, y-axis= plausibility, and z-axis= clairvoyance.

### 3.3 Example

Let us consider an expert's judgment regarding confidence as *preponderant*, denoted by  $\alpha_c = 7$ , with a corresponding subjective probability of  $Pr(H) = 0.88$  (Table 2). Additionally, the expert judges the plausibility as *convincing*, indicated by  $\alpha_p = 5$ , with a subjective probability of  $Pr(E|H\&M) = 0.83$  (Table 2). The prior and likelihood subjective probabilities are organized in matrices:

$$\mathbf{P}(\Theta)^T = [Pr(H), Pr(\neg H)] = [0.88, 0.12]$$

$$\Delta\mathbf{P}(\Theta) = \begin{bmatrix} Pr(H) & 0 \\ 0 & Pr(\neg H) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.88 & 0 \\ 0 & 0.12 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{P}(\mathbf{X}|\Theta) = \begin{bmatrix} Pr(E|H\&M) & Pr(E|\neg H\&M) \\ Pr(E|\neg H\&M) & Pr(E|H\&M) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.83 & 0.17 \\ 0.17 & 0.83 \end{bmatrix},$$

so that the conditional probabilities are:

$$\mathbf{P}(\mathbf{X}) = \mathbf{P}(\mathbf{X}|\Theta)\mathbf{P}(\Theta) = \begin{bmatrix} 0.83 & 0.17 \\ 0.17 & 0.83 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.88 \\ 0.12 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.75 \\ 0.25 \end{bmatrix},$$

and the posterior probabilities are:

$$\mathbf{P}(\Theta|\mathbf{X}) = \Delta\mathbf{P}(\Theta)\mathbf{P}(\mathbf{X}|\Theta)\Delta\mathbf{P}(\mathbf{X})^{-1} = \begin{bmatrix} 0.88 & 0 \\ 0 & 0.12 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.83 & 0.17 \\ 0.17 & 0.83 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/0.75 & 0 \\ 0 & 1/0.25 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.97 & 0.58 \\ 0.03 & 0.42 \end{bmatrix}$$

Thus, sensibility is 0.97, specificity is 0.42, type-I error (*FPR*) is 0.58 and type-II error (*FNR*) is 0.03. Next, WoE and CA values are obtained:

$$W(H|E\&M)_{ik} = \log_{10} \left( \frac{Pr(H|E\&M)Pr(\neg H)}{Pr(\neg H|E\&M)Pr(H)} \right) = \log_{10} \left( \frac{0.97 \cdot 0.12}{0.03 \cdot 0.88} \right) = 0.70$$

$$IV(H|E\&M)_{ik} = \frac{(FPR - FNR)W(H|E\&M)}{\max((FPR - FNR)W(H|E\&M))} = \frac{(0.58 - 0.03) \cdot 0.70}{0.465} = 0.83$$

where  $\max((FPR - FNR)W(H|E\&M))$  is computed using  $\alpha_c = \alpha_p = 9$ .

Thus, *H* should be accepted.

#### 4. Illustration of the approach

Let us consider a hypothetical example drawn from real cases of accidental mine spills to illustrate our approach. A holding pond failure occurred at the KK Mine, resulting in the spillage of 60,000 m<sup>3</sup> of metal-contaminated waters into a public watercourse. The plume traveled downstream and reached a major reservoir located 200 km away. The mine water inundated natural ecosystems, agricultural and ranching lands, waterholes, and also contaminated 76 water wells. Elevated metal concentrations, exceeding tolerable thresholds, were predominantly found on surface sediments covering approximately half of the channel area and one-third of the floodplain area.

The KK Mining Corporation (KKMC) promptly implemented a program to contain the spill, initiated scientific studies to assess the environmental impacts of the release, and commenced the development of a remediation strategy. KKMC asserted that the measures undertaken, which included the construction of an emergency containment wall to halt the flow of contaminated water, successfully prevented environmental damage downstream.

The environmental authorities requested a PEEIA to evaluate the physical, chemical, and biological impacts that occurred immediately following the holding pond failure. The assessment spanned a period of 12 months after the spillage. The primary question at hand was deceptively

simple: Did the spill cause the observed environmental damages along the watercourse one year after the accident?

Experts carried out the necessary assessments following established scientific methods and protocols that met or exceed regulatory requirements. These assessments focused on investigating three main areas: (1) biological impacts on aquatic biota, including sediment-dwelling communities, plants, invertebrates, and fish, as well as on soil-dependent biota in the affected floodplain and adjacent forest lands; (2) physical impacts caused by metal deposition on the watercourse, floodplain, and adjacent forests lands; and (3) chemical impacts on soil, water, and sediment quality in the watercourse and the reservoir.

As anticipated, experts analyzing the same evidence held different viewpoints based on their training and experience. On one side, the mining regulatory agency, geological academic institutions, and KKMC tended to downplay the magnitude of the environmental damage resulting from the spill. On the other side, experts in environmental sciences concluded through their investigation that the spill was responsible for significant and widespread long-term environmental damage.

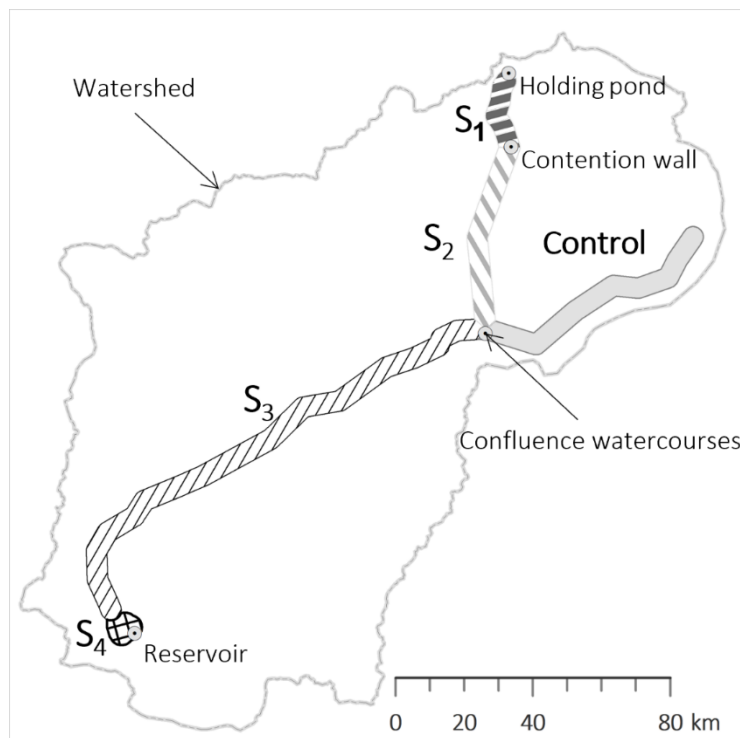
Analytically speaking, the controversy centered around two issues concerning the state of the region: (1) the national geological survey had already established high baseline concentrations of metals in sediments throughout the region, and (2) legacy contamination of acid mine drainage, continuously produced and discharged into the environment from abandoned mines, was a persistent concern.

Based on these issues, a largely unexamined conjecture arose that any potential environmental damage caused by the spill would be negligible in comparison. Consequently, the first and foremost methodological challenge lied in determining the worth of expert judgment regarding the rejection of this unexamined conjecture as provably false, as well as the acceptance of alternative conjectures that connect the spill to evidence of environmental damage as provably true.

#### 4.1 Axiomatization

During axiomatization, the analysis of expert judgments led to the identification of 11 concepts, 10 axioms, and 6 theorems (Tables 3-5). The formal mechanism-based explanations,

$M$ , provided scientifically acceptable beliefs about the truth of the hypotheses,  $H_i$ , linking the spill to environmental damage (Table 6). To account for the socioenvironmental heterogeneity of the watercourse, a set of homogeneous zones or settings, denoted as  $\{S_k | S_1, S_2, \dots, S_n\}$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ ,  $n = 4$ , was identified (Figure 2). In each setting  $S_k$ , hypothesis  $H_{ik}$  involving mechanism  $M_{ik}$  may provide the best explanation for evidence  $E_k$  but not necessarily in setting  $S_l$  for evidence  $E_l$ ,  $k \neq l$



**Figure 2. Hypothetical watershed with the affected watercourse (grey hatched patterns) and the control watercourse (solid grey);  $S_1$  to  $S_4$  denote the settings.**

**Table 3. Definitions**

	<b>Concept</b>	<b>Definition</b>
D1	Spill	Plume of heavy-metal-laden, toxic acidic solution (pH < 2.8).
D2	Exposure	Natural elements that are susceptible to being impacted by the spill.
D3	Affected watercourse	Watercourse affected by the spill.
D4	Control watercourse	Watercourse unaffected by the spill, used as the control.
D5	Bioavailability	Rate at which organisms take up heavy metals.
D6	Bioaccumulation	Gradual accumulation of heavy metals in organisms
D7	Biomagnification	Progressive increase in heavy metal concentrations along food chains.
D8	Environmental damage	Adverse impacts of heavy metals on natural elements.
D9	Natural element	Biota, habitat, ecosystems, and resources <i>in natura</i>
D10	Forest stand	Community of trees of a homogeneous composition and structure.
D11	Fish population	Group of reproductive individuals belonging to the same species that inhabits the watercourse ecosystems of the Sonora River watershed

**Table 4. Axioms**

	<b>Axiom</b>
A1	Even though heavy metals occur naturally, spills can still cause environmental damage (from D1, D8).
A2	The concentration of heavy metals exhibits a positive correlation with the severity of environmental damage (from D2, D8).
A3	The concentration of heavy metals in natural elements and the water column depends on adsorption and desorption rates in sediments, and biophysical factors, including temperature, hydrodynamics, redox conditions, organic matter, microbiota, salinity, and texture and depth of sediments (from D2, D9)
A4	The severity of environmental damage exhibits a positive correlation with the extent of exposure of natural elements (from D2, D3, D8, D10).
A5	The severity of environmental damage exhibits a positive correlation with the degree of bioavailability, bioaccumulation, and biomagnification (from D2, D3, D5, D6, D7, D8, D10).
A6	Acidic pH contributes to the mobilization of adsorbed/precipitated metals in sediments into the water column (from D1, D3).
A7	The remobilization of heavy metals in sediments is influenced by both natural phenomena and human activities (from D1, D3).
A8	As the spill flows downstream, contaminants become increasingly diluted (from D1, D3)
A9	Abandoned mines along watercourses cause environmental damage independently (from D2, D3, D8)
A10	Watercourses exhibit spatial heterogeneity (from D3, D4).



**Table 5. Theorems**

<b>Theorem</b>	
T1	The adverse impact of heavy metals in plants and animals is proportional to exposure and bioavailability (from A1 to A4)
T2	The concentration of heavy metals in organisms at successively higher levels in food webs increases due to bioaccumulation and biomagnification (from A5, T1)
T3	Groundwater contamination results from heavy metals leaching into aquifers (from T1, A4, A6, A7, A9)
T4	Spatial heterogeneity creates refugia that prevent exposure of aquatic populations to the spill (from A10 T1)
T5	Natural elements exposure decreases downstream (from A8, T1)
T6	Environmental damage is correlated to the flow of the plume, the number and conditions of abandoned mines, and spatial heterogeneity (from A6, A9, T1, T3, T5)

**Table 6. Hypothesis and mechanism-based explanations**

<b>Hypotheses</b>	<b>Mechanism-based explanations</b>
$H_{1,1}$ : The spill is the cause-in-fact of environmental damage in $S_1$	$M_{1,1}$ : Spill (D1) → exposure (D2) → environmental damage (D8, D9)
$H_{2,1}$ : The spill is the proximate cause of the higher mortality of forest stands in $S_2$ .	$M_{2,1}$ : Spill (D1) → heavy metals precipitation in the affected watercourse (D3) → exposure of forest stands (D2, D10) → remobilization → increased bioavailability (D5) → bioaccumulation in the trees (D6) → increased mortality of tree population
$H_{2,2}$ : There is no causal nexus between the spill and the high mortality of trees in $S_2$	$M_{2,2}$ : Spill (D1) → affected watercourse → absence of exposure (D2)
$H_{3,1}$ : The spill is the proximate cause of the temporal defaunation and the interruption of the annual reproductive cycle of fish populations in $S_3$ .	$M_{3,1}$ : Spill (D1) → exposure of aquatic biota (D2) → increased mortality of aquatic biota (D7) → temporal defaunation of the watercourse → interruption of the annual reproductive cycle of fish populations (D11) → recolonization of fish from refugia
$H_{3,2}$ : Extraordinary rainfall events are the proximate cause of the temporal defaunation of the affected watercourse nor the interruption of the annual reproductive cycle of fish populations.	$M_{3,2}$ : Spill (D1) → dilution of the plume downstream → lack of exposure of aquatic biota (D2) → extraordinary rainfall events → temporal defaunation along the watercourse (D3) → interruption of the annual reproductive cycle of fish populations (D11) → recolonization from refugia
$H_{4,1}$ : The spill is a causally relevant condition of the high concentration of heavy metals in water and sediments of the reservoir and the aquifers	$M_{4,1}$ : Spill (D1) → plume flowing downstream → precipitation of heavy metals in sediments (D3) → episodic mobilization of heavy metals → increased concentration of heavy metals in water and sediment of the reservoir and the aquifers → exposure (D2) → environmental damage (D8, D9)
$H_{4,2}$ : The spill is not causally relevant for the high concentration of heavy metals in both the water and sediments of the reservoir and the aquifers because multiple streams in the watershed drain.	$M_{4,2}$ : Spill (D1) → dilution of the plume → precipitation of heavy metals in sediments along the affected watercourse (D3) → episodic mobilization of heavy metals in the affected watercourse and other multiple streams in the watershed → dilution and precipitation processes of heavy metals in the affected watercourse and the other streams → untraceable addition of heavy metals from the spill into the reservoir and the aquifers

## 4.2 Inference

### 4.2.1 Setting $S_1$

Setting  $S_1$  extends a distance of 16 km downstream from the holding pond to the emergency containment wall (Figure 1). Evidence  $E_1$  and encompasses direct observations of the exposure of natural elements to the spill and is supported by the scientific studies conducted by the mine in the affected watercourse.

Inference for  $S_1$  concerns the causal minimalist counterfactual *but-for the spill, environmental damage would have not occurred*. This counterfactual inference gives rise to the hypothesis set  $\{H_{1,1}\}$ . Hypothesis  $H_{1,1}$  posits that *the spill is the cause-in-fact of environmental damage in  $S_1$* . It is derived from theorem T1 and implies mechanism  $M_{1,1}$  (Tables 3-6).

The confidence is considered *beyond doubt* ( $\alpha_c = 9$ ) and the plausibility is considered *conclusive* ( $\alpha_p = 9$ ). These judgements result in maximum clarity and minimum inductive risk (*FNR*). According to CA, therefore,  $H_{1,1}$  should be accepted as the best explanation for  $E_1$  (Tables 2, 7).

#### 4.2.2 Setting $S_2$

Setting  $S_2$  extends over a distance of 37 km downstream from the emergency containment wall to the confluence of the affected and control watercourses (Figure 2). Evidence  $E_2$  comprises a comparative study of riparian forest stands in the affected and the control watercourses. This study reveals a significant increase in tree mortality within the stands of the affected watercourse compared to the control (Figure 2). However, the evidence does not invalidate claims made by some experts that tree mortality anteceded the spill, suggesting that other factors may have preceded the observed environmental damage, preempting the spill's direct impact.

Inference for settings  $S_2$  pertains to the NESS counterfactual *the spill is a necessary element within the set of antecedent conditions (such as drought, disease, and exposure of sensitive natural elements) jointly sufficient to cause the observed high mortality of forest stands in the affected watercourse*. This counterfactual inference gives rise to the hypotheses set  $\{H_{2,1}, H_{2,2}\}$ .

Hypothesis  $H_{2,1}$  states that *the spill is the proximate cause of the higher mortality of forest stands in  $S_2$* . This hypothesis is derived from theorems T1 and T2 and implies mechanism  $M_{2,1}$  (Tables 3-6).

In contrast, hypothesis  $H_{2,2}$ , stating that *there is no causal nexus between the spill and the high mortality of trees in  $S_2$* , is derived from T1 and implies mechanism  $M_{2,2}$  (Tables 3-6). This hypothesis presupposes that antecedent environmental conditions (such as drought or disease) take precedence over the spill itself in causing the alleged environmental damage to forest stands.

The confidence for both hypotheses is considered *preponderant* ( $\alpha_c = 7$ ). The plausibility is considered *convincing* ( $\alpha_p = 5$ ) for  $M_{2,1}$  and *somewhat conceivable* ( $\alpha_p = 2$ ) for  $M_{2,2}$ . These judgments suggest that both hypotheses could be accepted. Nevertheless, the level of clarity is higher and the inductive risk lower for  $H_{2,1}$  than for  $H_{2,2}$ . According to CA, therefore,  $H_{2,1}$  should be accepted as the best explanation for  $E_2$  (Tables 2, 7).

#### 4.2.3 Setting $S_3$

Setting  $S_3$  spans a distance of 146 km downstream from the confluence of the affected and control watercourses to the reservoir (Figure 2). Evidence  $E_3$  includes a comparative study of fish populations based on sampling campaigns conducted in both the affected and control watercourses, as well as historical data. It shows the absence of juvenile stages in fish populations in the affected watercourse and the presence of juvenile stages as expected *in natura* in the control watercourse. There are two contrasting positions regarding  $E_3$ . On the one hand, it is posited that the plume caused the defaunation of the affected watercourse. This position explains the absence of juvenile stages as an outcome of the interruption of the annual reproductive cycle due to the extermination of the fish populations. On the other hand, it is postulated that the extraordinary rainfall extirpated fish populations from the affected watercourse after the spill. Both positions explain the predominance of adult stages in the samples by the repopulation of the affected area from refugia. However, one weakness of the latter position is that it fails to account for the presence of juveniles in the control watercourse, despite the extraordinary rainfall.

Inference for settings  $S_3$  concerns the NESS counterfactual *the spill is a necessary element in the set of antecedent conditions (including extraordinary rainfall events) jointly sufficient for the defaunation and interruption of the annual reproductive cycle of fish populations in the affected watercourse*, which gives rise to the hypotheses set  $\{H_{3,1}, H_{3,2}\}$ .

Hypothesis  $H_{3,1}$  states that *the spill is the proximate cause of the temporal defaunation and the interruption of the annual reproductive cycle of fish populations in  $S_3$* . This hypothesis is derived from theorems T1 to T4 and implies mechanism  $M_{3,1}$  (Tables 3-6).

In contrast, hypothesis  $H_{3,2}$ , stating that *extraordinary rainfall events are the proximate cause of the temporal defaunation of the affected watercourse nor the interruption of the annual*

*reproductive cycle of fish populations*, is derived from theorems T1 and T5 and implies mechanism  $M_{3,2}$  (Tables 3-6).

The confidence is considered *unequivocal* ( $\alpha_c = 5$ ) for  $H_{3,1}$  and *substantial* ( $\alpha_p = 3$ ) for  $H_{3,2}$ . The plausibility is considered *conceivable* ( $\alpha_p = 3$ ) for  $M_{2,1}$  and *problematic* ( $\alpha_p = 1/3$ ) for  $M_{2,2}$ . These judgments result in clarity for  $H_{3,1}$  and of opacity for  $H_{3,2}$  and suggest that the latter should be rejected due to its unacceptably high level of inductive risk (*FNR*). According to CA, therefore,  $H_{3,1}$  should be accepted as the best explanation of  $E_3$  (Tables 2, 7).

#### 4.2.4 Setting $S_4$

Setting  $S_4$  comprises the reservoir and aquifers located in the lowlands of the watershed of the affected watercourse (Figure 2). The reservoir collects water from several watercourses during high flows, while both the reservoir and the aquifers supply water to agriculture and cities during low flows. Evidence  $E_4$  consist of studies on water quality that reveal high concentrations of heavy metals that matched the chemical composition of the spill. The main point of contentious regarding  $E_4$  revolves around the difficulty of distinguishing the specific impact of the spill among the multiple sources of contamination affecting the dam and the aquifers.

Inference for settings  $S_4$  concerns the NESS counterfactual *the spill is a necessary element in the set of antecedent conditions (including the influx of various polluted streams draining into the reservoir) jointly sufficient for increasing the contamination by heavy metals of the water column and sediments of the reservoir and associated aquifers*. This counterfactual inference gives rise to the hypotheses set  $\{H_{4,1}, H_{4,2}\}$ .

Hypothesis  $H_{4,1}$  asserts that *the spill is a causally relevant condition of the high concentration of heavy metals found in the water and sediments of both the reservoir and the associated aquifers*. It is derived from theorems T3 and T6 and implies mechanism  $M_{4,1}$  (Tables 3-6).

In contrast, hypothesis  $H_{4,2}$  posits that *the spill is not a causally relevant condition for the high concentration of heavy metals found in the water and sediments of both the reservoir and the associated aquifers*. It is derived from theorems T1, T3, T5, and T6 and implies mechanism  $M_{4,2}$  (Tables 3-6).

The confidence is considered *suspicious* ( $\alpha_c = 1/5$ ) for  $H_{4,1}$  and *substantial* ( $\alpha_c = 3$ ) for  $H_{4,2}$ . The plausibility is considered *speculative* ( $\alpha_p = 1/5$ ) for  $M_{4,1}$  and *conceivable* ( $\alpha_c = 3$ ) for

$M_{4,2}$ . These judgments result in opacity for  $H_{4,1}$  and clarity for  $H_{4,2}$ , suggesting that the former should be rejected due to its the unacceptably high inductive risk ( $FPR$  and  $FNR$ ). According to CA, therefore,  $H_{4,2}$  should be accepted as the best explanation of  $E_4$  (Tables 2, 7).

**Table 7. Summary of results of the evaluation of hypotheses and mechanisms.**

<i>S</i>	<i>E</i>	<i>H</i>	<i>M</i>	<b>Con</b>	<b>Pla</b>	<b>Sen</b>	<b>Spe</b>	<b>FPR</b>	<b>FNR</b>	<b>WoE</b>	<b>IV</b>
$S_1$	$E_1$	$H_{1,1}$	$M_{1,1}$	0.90	0.90	0.99	0.50	0.50	0.01	2.20	1.00
$S_2$	$E_2$	$H_{2,1}$	$M_{2,1}$	0.88	0.83	0.97	0.42	0.58	0.03	1.61	0.83
		$H_{2,2}$	$M_{2,2}$	0.88	0.67	0.93	0.22	0.78	0.06	0.69	0.46
$S_3$	$E_3$	$H_{3,1}$	$M_{3,1}$	0.83	0.75	0.94	0.38	0.63	0.06	1.10	0.58
		$H_{3,2}$	$M_{3,2}$	0.75	0.25	0.50	0.10	0.90	0.50	-1.10	-0.41
$S_4$	$E_4$	$H_{4,1}$	$M_{4,1}$	0.17	0.17	0.04	0.50	0.50	0.96	-1.61	0.69
		$H_{4,2}$	$M_{4,1}$	0.75	0.75	0.90	0.50	0.50	0.10	1.10	0.41

$S$  = Setting,  $E$  = Evidence,  $H$  = Hypothesis,  $M$  = Mechanism, Con = Confidence, Pla =Plausibility, Sen = Sensibility, Spe = Specificity, FPR = False positive rate, FNR = False negative rate, WoE = Weight of Evidence, and IV = Information value

## 5. Discussion

We have demonstrated the efficacy of formal abductive reasoning in addressing the demanding task of evaluating expert judgment and navigating the intricate and controversial context encountered in PEEIA for large scale infrastructure investments.

We agree with Foster (2011) on the importance of considering multiple sources of uncertainty in adjudication proceedings. Our approach specifically tackles the epistemic and linguistic uncertainties that commonly arise in the adjudication process. Epistemic uncertainty pertains to imprecise data regarding the presence of the causal agent, while linguistic uncertainty emerges from experts' inclination to utilize ambiguous and vague judgments, such as "the worst environmental disaster," "inexplicable environmental damage", or "the damage was contained." Furthermore, our approach also addresses what McGoey (2012, 2007) describes as the institutional "will of ignorance," which occurs when regulatory agencies and academic institutions may restrict the scope of a PEEIA by underplaying the uncertainty associated with expert judgments. In this context, our illustrative example demonstrates how the integration of axiomatization, WoE, and CA facilitates a comprehensive examination of conjectural knowledge concerning environmental torts. Additionally, it highlights the significance of addressing

uncertainty through the confirmation and acceptance rules of inductive risk. Specifically, we have shown the advantages of developing mechanism-based explanations that provide scientifically sound justifications regarding the veracity of the causal link between the observed environmental damage and the tortfeasor's actions (or inactions).

From a legal standpoint, we argue that the inherent uncertainty within a PEEIA renders the notion of “primacy of scientific proof” unattainable. Given that expert judgment is always subject to question and debate, as highlighted by Beattie (1995), Kontic (2000), Lemons et al., (1997) and Shrader-Frechette and McCoy (1994), our approach proves valuable in determining the acceptable level of uncertainty to satisfy the standards governing the burden of proof and legal presumptions (or inferences derived from the evidence, established law, and logic). As noted by Cranor (2004) and Lin (2004), assessing the degree of uncertainty necessitates calculating the odds that the causal agent is responsible for the environmental damage, while also evaluating the reliability of expert judgment in linking the evidence of environmental damage to the alleged tortious conduct. This is where both epistemic and non-epistemic values play a role in the application of confirmation and acceptance rules regarding inductive risk (Douglas, 2000). The former corresponds to the utilization of statistical significance thresholds as a legal standard of proof (Burtis et al., 2017), while the latter aims to minimize the risk of false negative diagnosis of tortious conduct (Lemons et al., 1997; Shrader-Frechette & McCoy, 1994). Therefore, we argue that our approach establishes “proof by clear and convincing evidence” as the norm for determining which hypothesis should count as causally significant within the framework of PEEIA.

In our approach, the rules of confirmation require the explicit articulation of claims presented forward by experts as a set of competing, falsifiable hypotheses  $\{H_i | H_1, H_2, H_3, \dots, H_n\}$ . For each hypothesis, the rules of confirmation are implemented through the subjective probability of confidence,  $Pr(H)$ , which represents the prior judgment concerning the presence of the causal agent in a given context or setting.

The rules of acceptance align with the legal standard of proof commonly known as “more likely than not.” These rules are operationalized by considering the subjective probability of plausibility or likelihood,  $Pr(E|H\&M)$ , associated with the description, as well as the tolerable level of scientific uncertainty pertaining to the rebuttable legal presumptions related to the set of

mechanisms  $\{M_i|M_1, M_2, M_3, \dots, M_n\}$ . It is worth noting that the plausibility condition the probability of evidence  $E$ , on both  $H$  and  $M$ , capturing what O'Leary (1995) refer to as the semantic uncertainty or ambiguity associated with the categorization of the data as specific evidence of environmental damage. In our approach, the use of the matrix form of Bayesian inference and subjective probabilities enables the rigorous and systematic incorporation of multiple sources of uncertainty in WoE. Importantly, the uncertainty related to confidence (i.e., the belief regarding the presence of the causal agent in a specific location) remains independent of the uncertainty associated with plausibility (i.e., the belief regarding the causal mechanism linking the spill with environmental damage). Through the application of CA, our approach determines the worth of expert judgment by assessing the trade-off between type-I and type-II errors ( $FPR - FNR$ ), thereby aligning the results of statistical inference with the legal standard of proof in evaluating the veracity of environmental tort claims.

While we coincide with Mock (1971) that expert judgment is valuable insofar as it enhances our understanding of the real world and influences our expectations of certain events, we contend that our approach specifically addresses the problem of determining the worth of expert judgment in abductive reasoning. To illustrate this point, we can consider the metaphor of a perfect clairvoyant, such as Laplace's demon, who possesses complete omniscience and flawless ability to reconstruct past events. This perfect clairvoyant symbolizes a hypothetical scenario wherein all uncertainty is entirely eliminated from the process of adjudicating environmental torts. It serves as an illustration of the upper limit or ideal state of clairvoyance, where the complete and accurate understanding of the causal relationships involved is achieved without ambiguity or doubt. However, in reality, various factors such as statistical effects, incompetence, or even mendacity in information sources can introduce imperfections in clairvoyance, potentially representing the lower limit. Within this spectrum of clairvoyance, experts exhibit a range of capacities in accurately detecting the presence of the causal agent (confidence) and describing the causal connections (plausibility). Our approach takes into account these variations and aims to assess and determine the worth of expert judgment within the context of abductive reasoning.

Regarding Bayesian inference, Morgan (2014) argues that the cognitive shortcuts most relevant to expert elicitation of subjective probabilities are "availability heuristic" and "anchoring and adjustment heuristic." The availability heuristic relates to the ease with which instances or occurrences of a phenomenon can be brought to mind, while the anchoring and adjustment



heuristic refers to the influence of initial information, or "anchor," and subsequent revision of beliefs to align closely with that anchor. The availability heuristic is applicable to the preconceived hypotheses regarding the liability of the agent, while anchoring and adjustment heuristics pertain to beliefs regarding the accuracy of detecting the causal agent and the validity of conjectured explanatory mechanisms. These heuristics are related to the epistemic uncertainty that arises due to the qualitative nature of the concepts of confidence and plausibility employed in Bayesian inference. Herein lies an advantage of our approach, as we utilize words and propositions as computational objects to address the limitation inherent in expert's cognition.

In line with Dong and Xu (2019), we acknowledge the importance of employing linguistic variables as computational objects. In our approach, the use of linguistic variables allows for the systematic conversion of qualitative assessments into quantifiable measures. By leveraging linguistic variables within the AHP, our approach enables a more nuanced and detailed representation of expert judgments, resulting in enhanced precision of the confidence (prior) and plausibility (likelihood) subjective probabilities used in the matrix form of the Bayes theorem. This incorporation of linguistic variables contributes to improved accuracy and reliability of the calculations involved in the Bayesian inference process, thereby promoting a more precise and transparent evaluation of the explanatory value of different hypotheses pertaining to environmental torts.

It is important to acknowledge that data related to environmental torts comprises claims that are collectively considered to have strong justifications for belief at the onset of a PEEIA. However, it is crucial to emphasize that data should not be contingent upon personal beliefs, appearances, subjective perceptions, or language usage. Rather, they are claims that experts find compelling and supported by robust reasons for belief. Hence, a central concern in PEEIA is the use of expert judgment in formulating dependable hypotheses about the truth of environmental tort claims. In our approach, axiomatization serves as a didactic tool that aids experts in constructing a coherent explanation grounded in the available data. In essence, axiomatization requires experts developing hypotheses to defend their claims with positive or normative reasons and supporting arguments. This approach ensures that the reasoning behind assertions related to environmental damage is well-founded and justified. By identifying and presenting positive or normative reasons and arguments, axiomatization plays a valuable role in facilitating the systematic and evidence-based analysis of environmental damage. Likewise, the integration of

WoE and CA simplifies two essential tasks in the context of adjudication. Our approach not only helps determine whether the alleged environmental damage can be attributed to the tortfeasor or is a result of overdetermination but also assists in establishing the burden of proof. In our illustrative example, the results demonstrate that the acceptance of hypothesis  $H_{1,1}$  poses no issues as it aligns with causal minimalism. This acceptance corresponds to the upper limit of clairvoyance (Table 7). On the other hand, the acceptance of hypotheses  $H_{2,1}$  and  $H_{3,1}$  implies the liability of KKMC for the environmental tort. Consequently, the burden of proof rest with KKMC to demonstrate the lack of a causal nexus between the spill and the alleged mortality of forest stands in site  $S_2$ , as well as the absence of juveniles in fish populations in site  $S_3$ . On the other hand, the evidence  $E_4$  suggests overdetermined causation, specifically involving contaminated water from abandoned mines flowing into the reservoir through numerous streams, while the plume has already diluted. Accordingly, accepting hypothesis  $H_{4,2}$  as the best explanation for  $E_4$  indicates that KKMC is not liable. Consequently, the burden of proof regarding the causal nexus between the spill and environmental damage at site  $S_4$  lies with the environmental authorities.

It is important to acknowledge that the process of abductive reasoning can encounter challenges under certain conditions. Two specific ones that can make the abductive reasoning process cumbersome are worth noting. In the first place, when dealing with as set of hypotheses  $\{H_i|H_1, H_2, H_3, \dots, H_n\}$ , the pairwise comparison of these hypotheses is necessary to conform to Bayesian inference. This step can be time-consuming even when the number of hypotheses in a set is relatively small because it requires careful consideration and evaluation of each hypothesis in relation to one another.

Second, the process of obtaining subjective probabilities for the hypotheses is susceptible to the so-called “curse of dimensionality,” a concept originally introduced by Bellman (1957). The curse of dimensionality highlights the fact that the amount of required evidence increases exponentially with the number of socio-environmental variables associated with a particular causal mechanism  $M$ . As the complexity of the causal mechanism increases, the challenge of obtaining accurate and reliable evidence becomes more pronounced.

To mitigate the curse of dimensionality, one possible approach is to decompose  $M$  into smaller components to reduce the number of variables involved. This decomposition can help

alleviate the amount of evidence required to generate accurate and reliable subjective probabilities. However, it is important to note that as  $M$  is decomposed, the number of hypotheses may increase accordingly. Each decomposed component may introduce additional hypotheses that need to be considered and compared. Therefore, while decomposition and variable reduction can help manage the curse of dimensionality, they may also lead to an increase in the number of hypotheses that need to be analyzed and evaluated.

Finding the right balance between decomposition and managing the number of hypotheses is crucial to maintain the efficiency and effectiveness of the abductive reasoning process. It requires careful consideration of the complexity of the problem at hand and the trade-offs between computational feasibility and the depth of analysis required.

In some cases, it is possible for candidate hypotheses in abductive reasoning to have similar levels of clairvoyance values. This similarity can create difficulties in determining the best explanation and may reflect a significant degree of uncertainty in the evaluation of causal claims. The high level of uncertainty can hinder the adjudication process, making it challenging or even impossible to reach a definitive conclusion.

To address this predicament, one approach is to gather additional evidence. By obtaining more empirical data and information, it becomes possible to augment the evidentiary basis and differentiate between competing hypotheses more effectively. The analysis of expert judgments using the axiomatization framework of our approach can be valuable in guiding the collection of additional evidence. It provides a structured and systematic procedure to identify areas where further evidence is required to support or refute specific causal claims.

## **6. Conclusions**

We have introduced a systematic approach that effectively addresses the intricacies of expert judgment and the adjudication process pertaining to environmental torts. This approach is relevant to effectively navigate the complex and contentious landscape commonly encountered in PEEIA for large-scale infrastructure investments.

Our approach focuses on assessing the information worth of candidate hypotheses that establish the causal nexus between evidence of environmental damage and the responsible party. Through the integration of axiomatization, WoE, CA, and consideration of inductive risk, our approach strengthens the overall efficacy and robustness of abductive reasoning in the

adjudication process. Axiomatization provides a structured and logical framework for analyzing expert judgments and refining the understanding of underlying causal mechanisms. This systematic approach ensures a comprehensive evaluation of the available evidence and expert judgments. The WoE and CA methodologies further contribute to a thorough assessment of the evidence, facilitating the identification of the most compelling hypotheses. Additionally, the consideration of inductive risk acknowledges the importance of balancing the consequences of both false positive and false negative outcomes in minimizing the potential of erroneous assessment of hypotheses.

Overall, our systematic approach offers a robust and effective means for evaluating evidence, refining hypotheses, and ultimately achieving a fair determination of liability in environmental tort cases involving large-scale infrastructure investments.

### **Acknowledgments**

This article is a partial fulfillment of the requirements of Paola Gómez Priego, the first author, for the degree of Doctor in Sustainability Science, UNAM. The first author's studies were partially supported by the CONACYT scholarship 2019-000002-01NACF-12768.

### **7. References (fueron añadidas a la última sección para evitar duplicados)**

## **5. Síntesis del Observatorio de Evaluación del Impacto Ambiental (EIA) en el tema de turismo costero en el periodo 2002-2016**

### **5.1 Método**

Se llevó a cabo una revisión procesal de los trámites sometidos a impacto ambiental en el tema de turismo costero en el periodo 2002 al 2016. Para ello, se compilaron repositorios digitales, se construyó una base de datos de indicadores y en este documento se muestran una síntesis de los resultados principales.

#### **Compilación de repositorios digitales**

Se generaron repositorios digitales sistematizados para análisis con la siguiente información:

- Gacetas Ecológicas publicadas para el periodo comprendido entre el 2002-2016 (aunque se finalizó la búsqueda de resolutivos y acceso a la información hasta el año 2018) vía el enlace: <https://www.semarnat.gob.mx/gobmx/transparencia/gaceta.html>
- Expedientes completos asociados a las manifestaciones de impacto ambiental (MIA) de proyectos de desarrollo turístico costero locales y regionales publicadas en las Gacetas Ecológicas del periodo 2002-2016 mediante la descarga del portal <https://www.semarnat.gob.mx/gobmx/transparencia/constramite.html>
- El repositorio incluyó todos los documentos descargables: manifestaciones de impacto ambiental, resolutivos, informes de solicitud de información faltante y adicional, imagen del historial del trámite, documentos de procedimientos administrativos o sustitutos de resolutivos.

#### **Construcción de base de datos**

A partir de los repositorios digitales, se construyeron una base de datos basada en tres componentes e indicadores:

Indicadores compilados de las Gacetas Ecológicas

- Número de la Gaceta analizada
- Fecha de expedición de la Gaceta
- Año de expedición de la Gaceta
- Entidad federativa donde se desarrollaría el proyecto

- Municipio donde se desarrollaría el proyecto
- Sin registro de Municipio (aplicable a proyectos donde no quedó registrado el municipio).
- Lugar donde fue ingresada la Manifestación de Impacto Ambiental (MIA) para evaluación (DGIRA o Delegación de SEMARNAT en las entidades federativas)
- Clave del proyecto asignado por SEMARNAT al ingresar el proyecto a evaluación (incluye omisiones de asignación de número de expediente y diferencias de número de expediente entre el ingreso y el resolutivo)
- Modalidad del proyecto: Regional o Particular
- Informe preventivo (si aplicó en el trámite)
- Cambio de uso de suelo (si fue incluido en el mismo trámite)
- Permiso ZOFEMAT (si fue incluido en el mismo trámite)
- Registro en gaceta de resolutivo (fecha de expedición del resolutivo o si en la gaceta nunca se publicó el resolutivo, aunque aparezca en el historial del trámite de la MIA.
- Posibilidad de descarga del resolutivo
- Días entre la emisión de resolutivo y el ingreso de la MIA
- Vigencia del proyecto
- Presencia del resolutivo, pero no del ingreso a evaluación

Indicadores compilados del historial del trámite

- Registro no disponible en la consulta
- Registro del extracto publicado
- Presencia de oficio de prevención de información faltante para la conformación del expediente
- Presencia de oficio de falta calidad de datos de la información técnica de la MIA
- Presencia de procedimiento ante PROFEPA
- Presencia de solicitud de información adicional o complementaria
- Presencia de solicitud de Consulta pública
- Consulta pública efectuada

Indicadores de disponibilidad de descarga de documentación vía el portal

- Resumen ejecutivo
- MIA

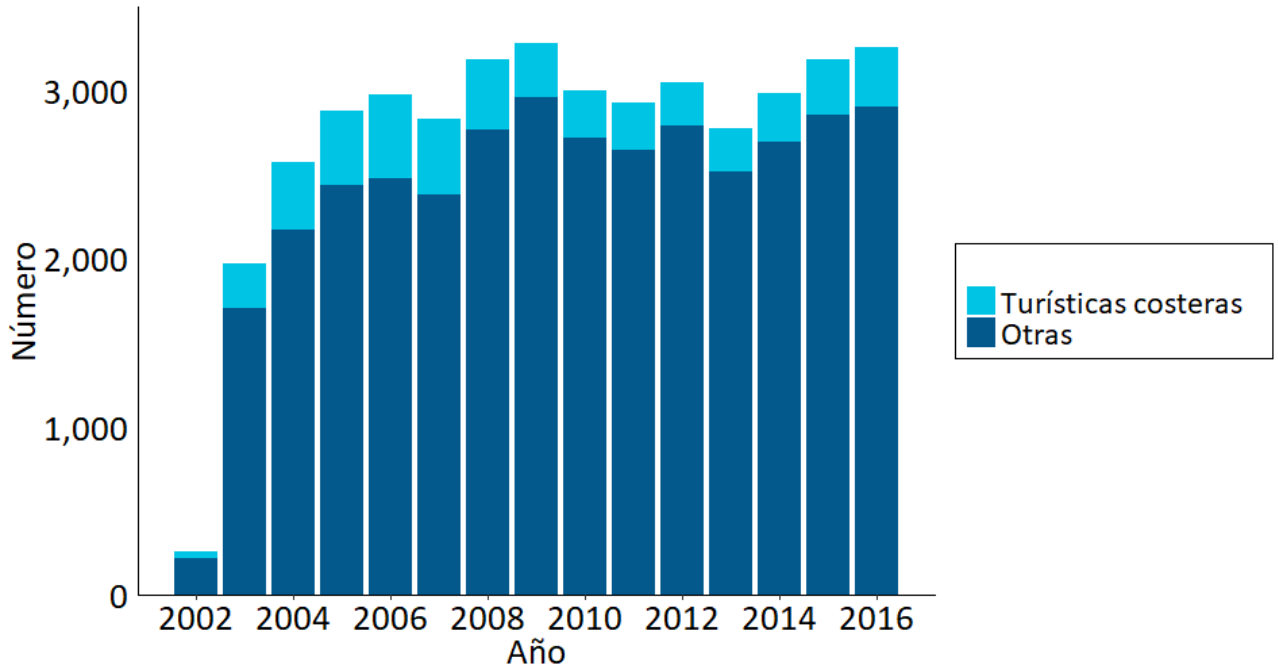
- Informe Preventivo
- Información adicional
- Resolutivo
- Trámite Unificado de cambio de uso de suelo ETJ

Indicadores de información extraída de resolutivos

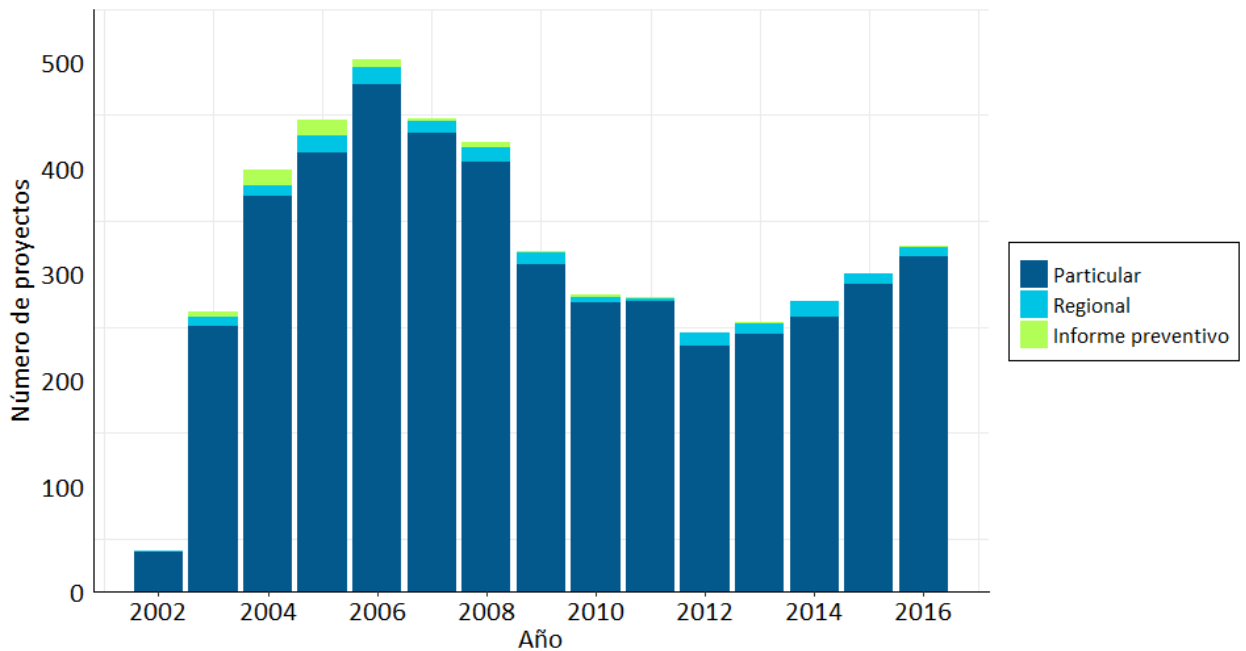
- Presencia de oficio de modificación del proyecto con autorización previa
- Presencia de oficio para subsanar omisiones
- No procede evaluación por: construcción terminada turnado a PROFEPA, solicitud de elaboración de una nueva MIA, improcedencia del proyecto
- Rechazo del trámite por vencimiento de plazo
- Exención, resolutivo no requiere MIA
- Resolutivo incompleto
- Notificación de ampliación del periodo de evaluación
- Informe preventivo, requerimiento de MIA
- Retracción o retiro del proyecto
- Vigencia del proyecto
- Consulta pública efectuada
- Reunión pública de información efectuada
- Solicitud de información adicional
- Autorización: rechazado, rechazado por falta de titularidad, autorizado sin condicionantes, autorizado con condicionantes, parcialmente autorizado, autorizado con cambio de uso de suelo, rechazado con justificación para no resolver
- Procedencia del oficio: DGIRA o Delegación estatal de SEMARNAT

## **5.2 Síntesis de análisis de indicadores**

En las siguientes gráficas se muestran algunos de los resultados más relevantes del análisis de indicadores del Observatorio de EIA.

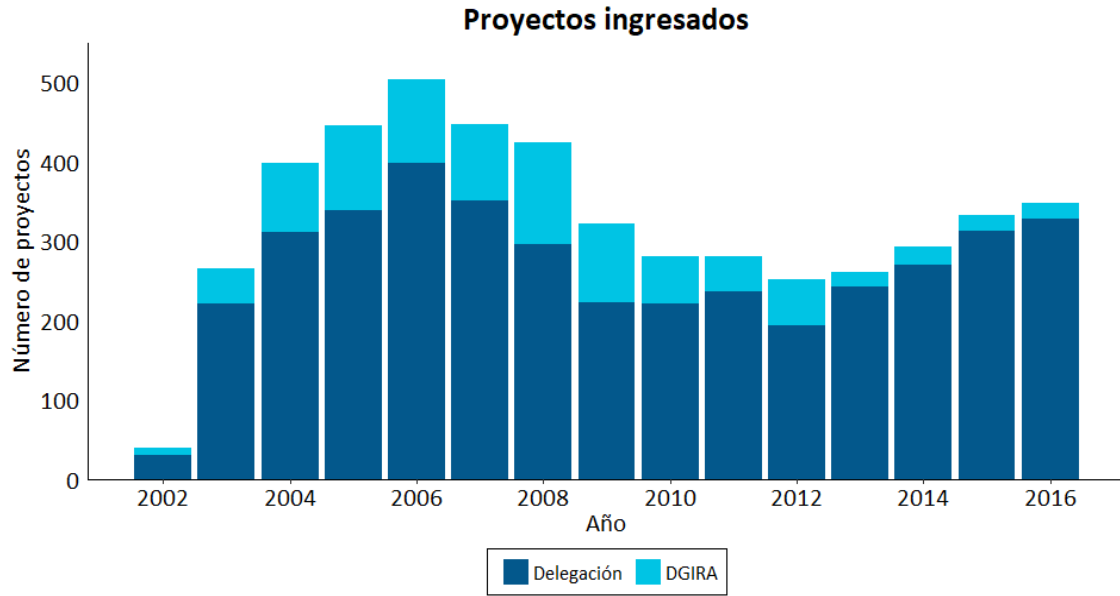


Gráfica 1. Proyectos ingresados a evaluación del impacto ambiental en el periodo 2002-2016 con base en los registros publicados en la Gaceta Ecológica. Se distingue del total, el número de proyectos turísticos costeros.

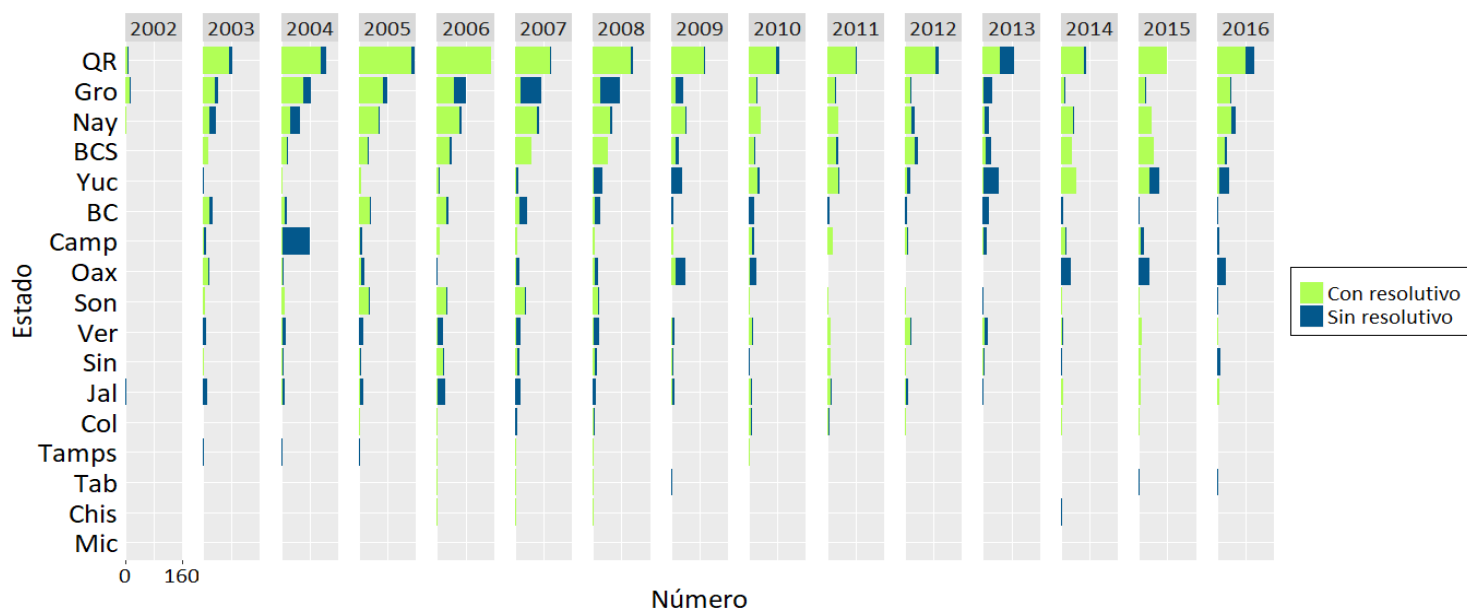


Gráfica 2. Modalidad de proyectos turísticos costeros sometidos a evaluación con base en los registros publicados en la Gaceta Ecológica.

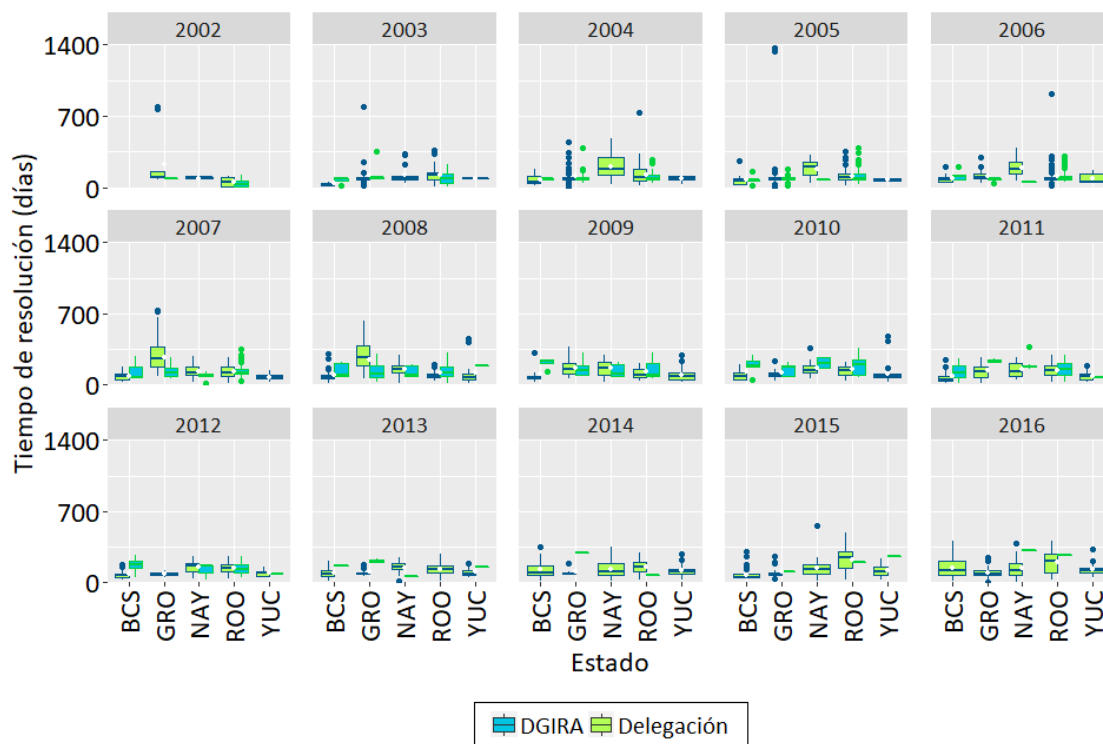




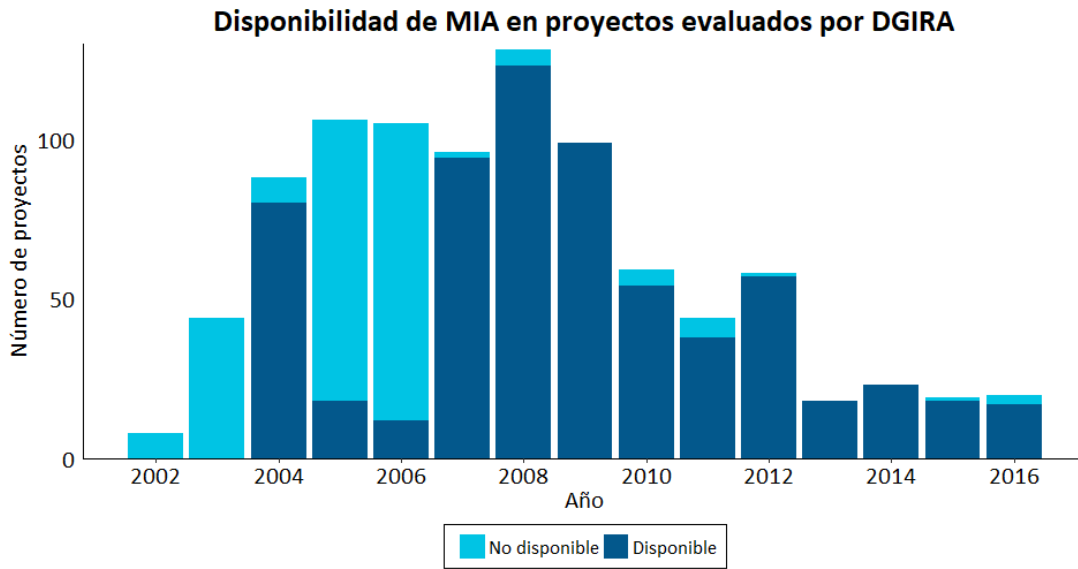
Gráfica 3. Proyectos ingresados en las oficinas centrales de la SEMARNAT (DGIRA) y en las representaciones de la SEMARNAT en los Estados (Delegación).



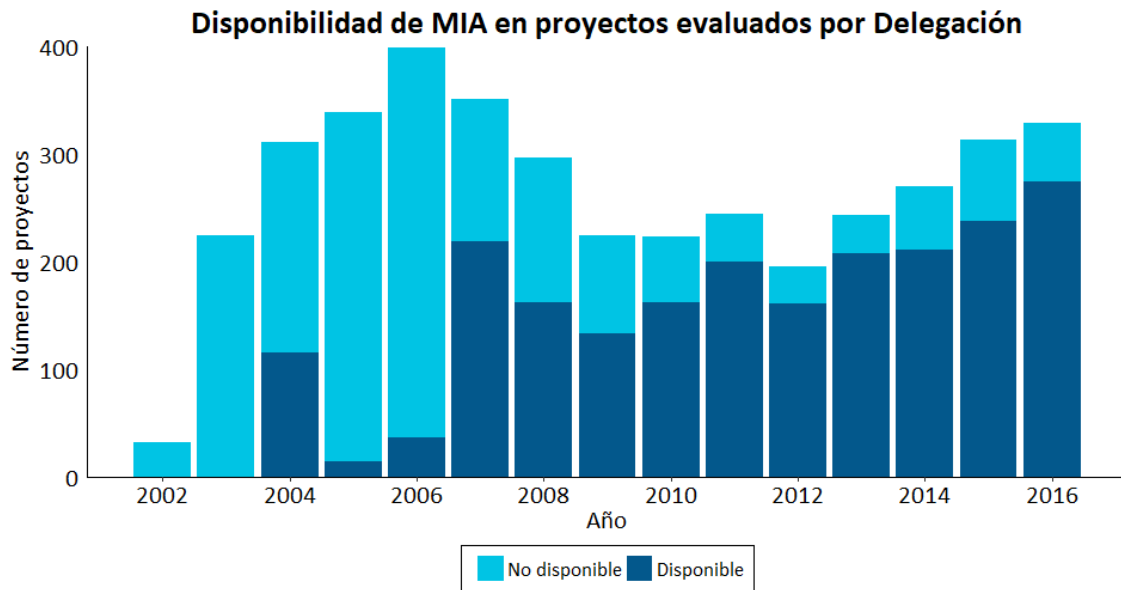
Gráfica 4. Número de proyectos de turismo costero sometidos a evaluación del impacto ambiental para los que no se publicó en la Gaceta Ecológica la emisión de un resolutivo por estado.



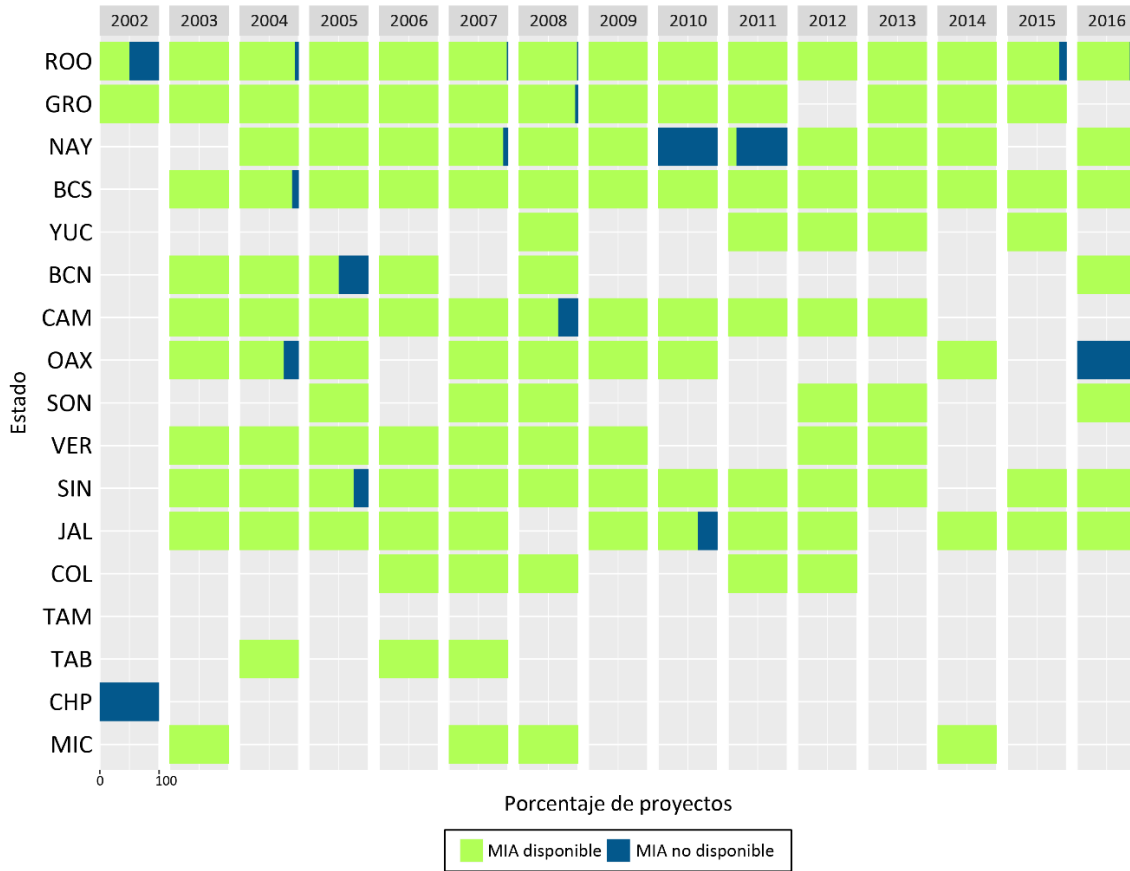
Gráfica 5. Tiempo transcurrido (en días) desde el ingreso de una MIA hasta la emisión de un resolutivo con base en información publicada en la Gaceta Ecológica, para los Estados con la mayor frecuencia de proyectos.



Gráfica 6. Disponibilidad de descarga en línea de la MIA en proyectos evaluados por las oficinas centrales de la SEMARNAT (DGIRA).

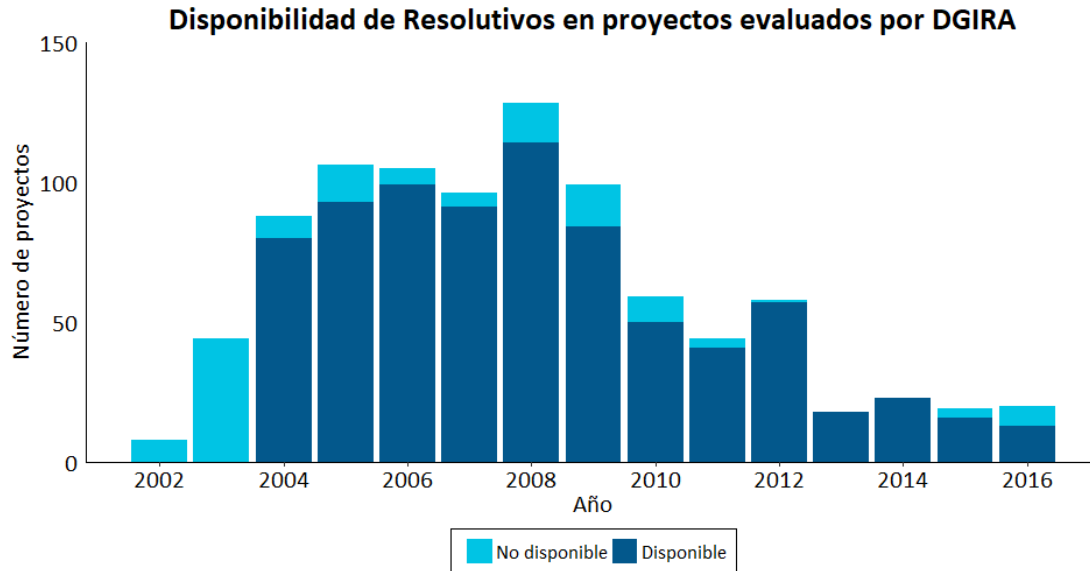


Gráfica 7. Disponibilidad de descarga en línea de la MIA en proyectos evaluados por las representaciones estatales de la SEMARNAT (Delegación).

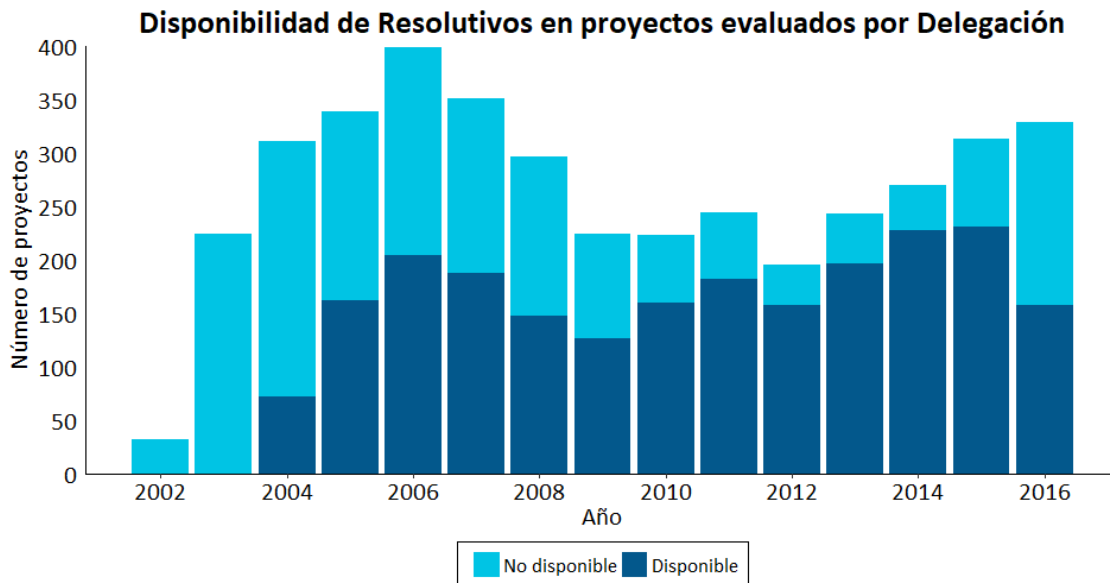


Gráfica 8. Porcentaje de proyectos para los que la MIA estuvo disponible para descarga por estado cuando fueron evaluados por la SEMARNAT (DGIRA).

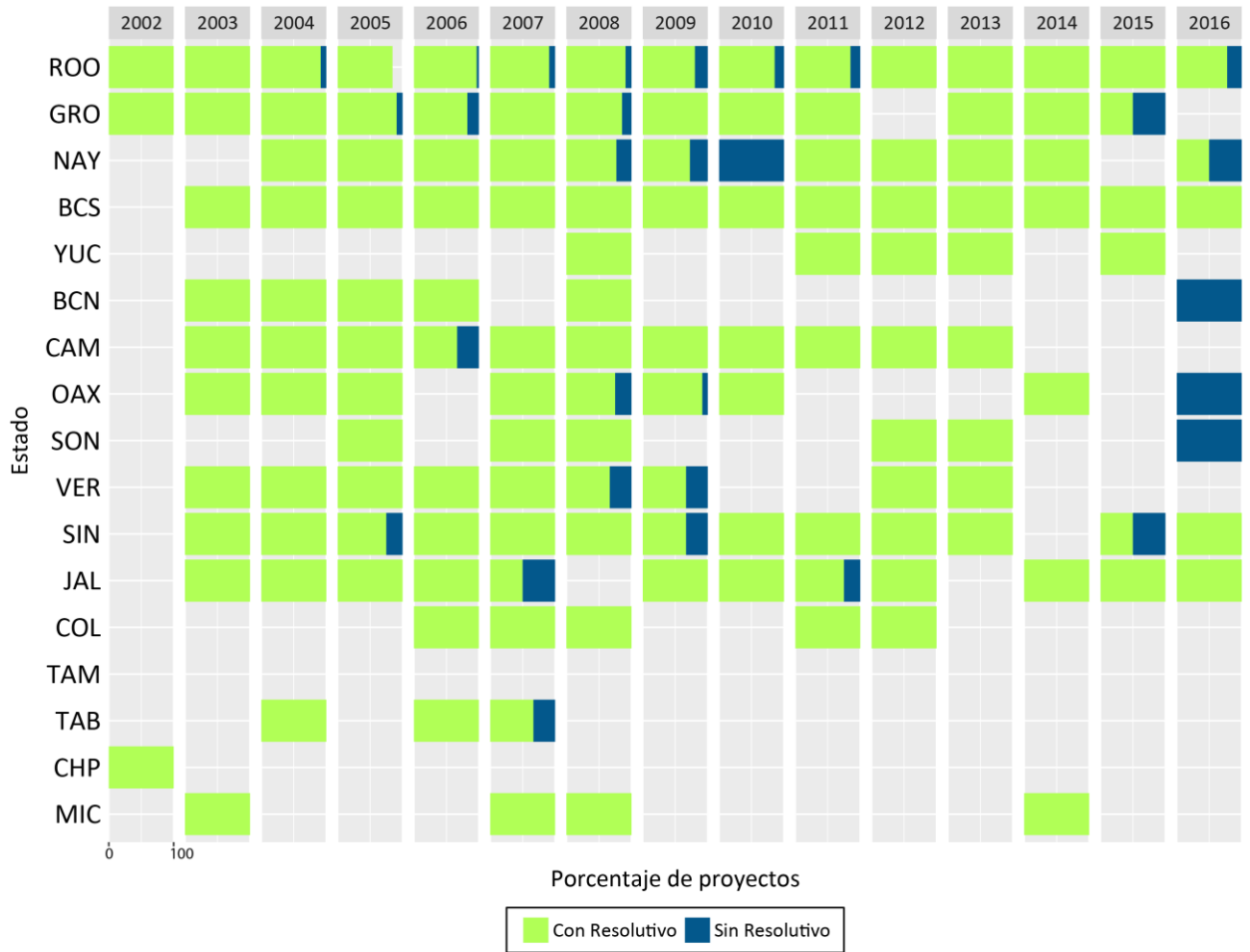




Gráfica 10. Disponibilidad de descarga en línea de los resolutivos de proyectos evaluados por las oficinas centrales de la SEMARNAT (DGIRA), para los que en la Gaceta Ecológica estuvo publicada la emisión de un resolutivo.



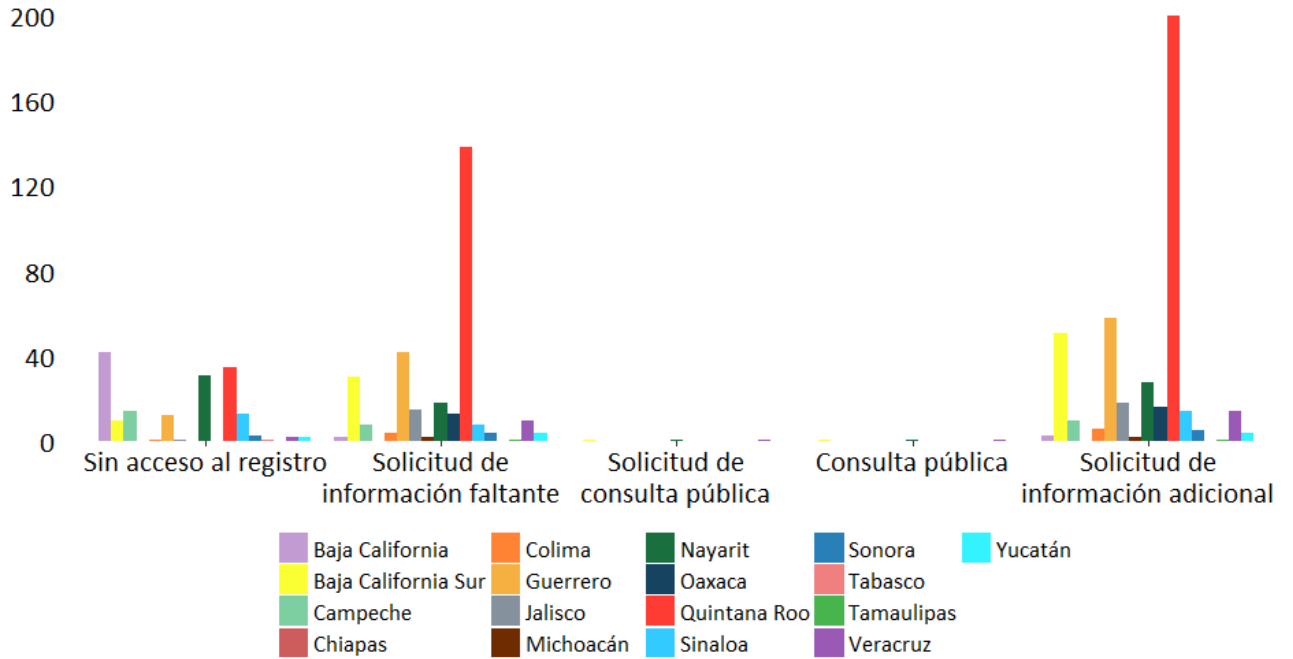
Gráfica 11. Disponibilidad de descarga en línea de los resolutivos de proyectos evaluados por las representaciones estatales de la SEMARNAT (Delegación), para los que en la Gaceta Ecológica estuvo publicada la emisión de un resolutivo.



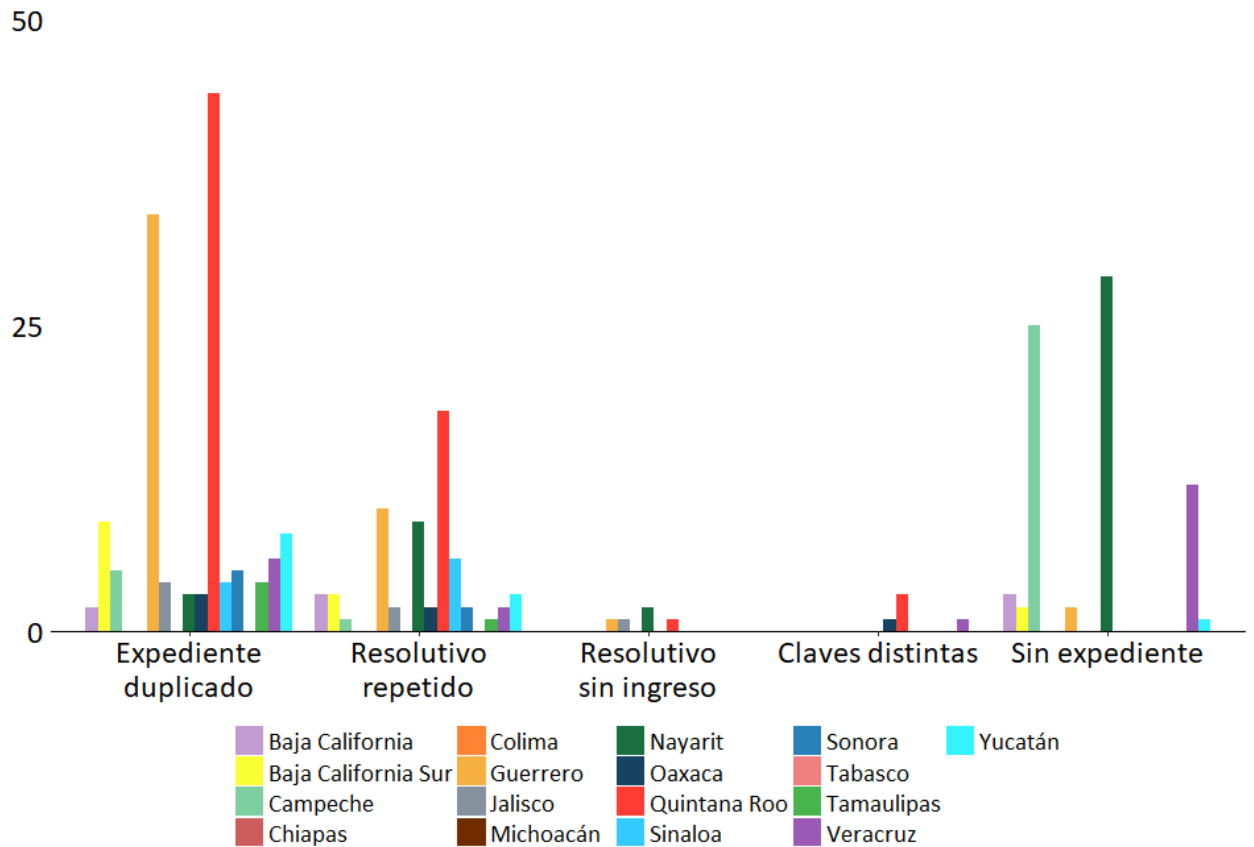
Gráfica 12. Porcentaje de proyectos para los que el resolutivo estuvo disponible para descarga por estado cuando fueron evaluados por la SEMARNAT (DGIRA). La revisión de Gaceta Ecológica se hizo hasta el año 2018.



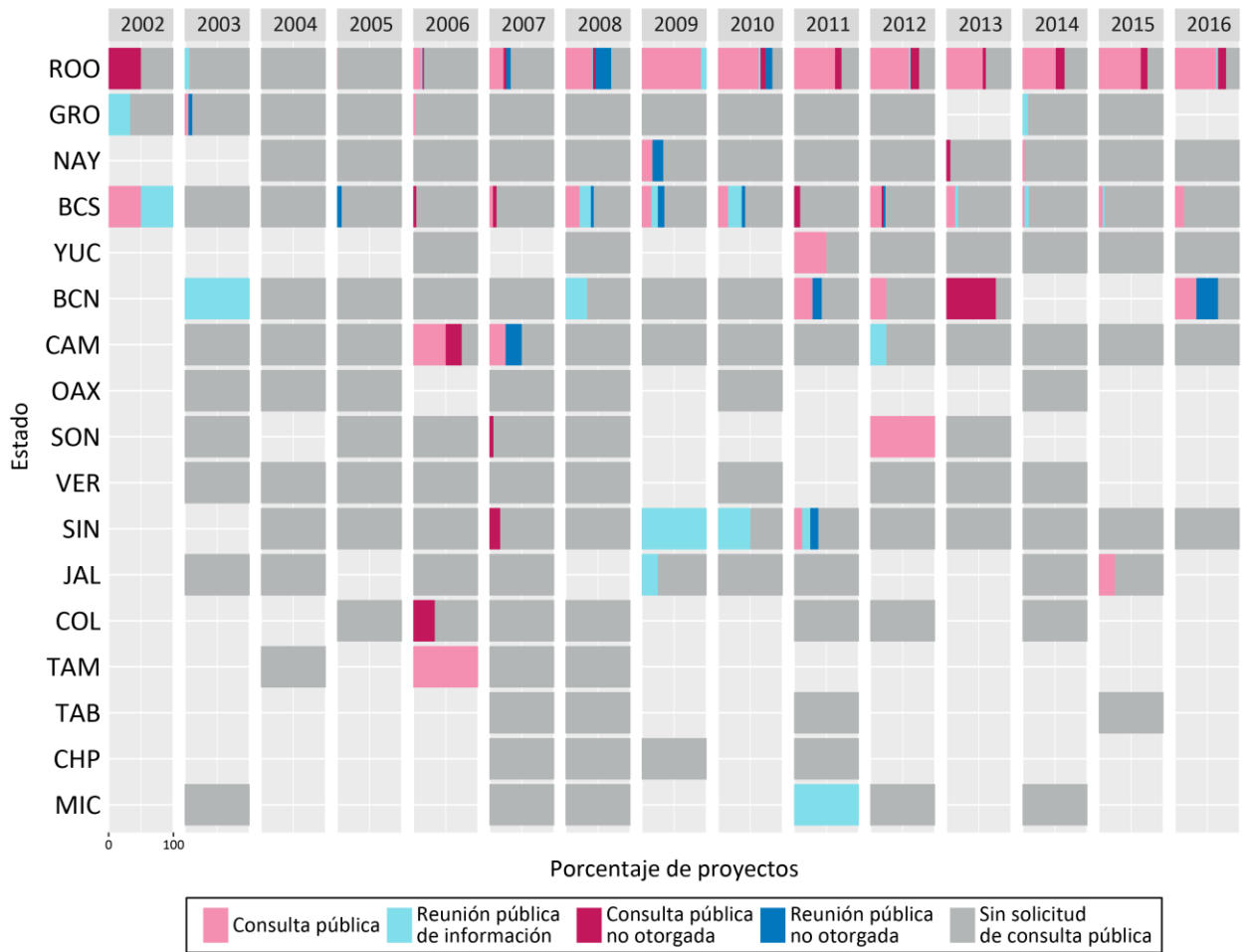




Gráfica 14. Número de registros para los que hubo registro en el historial del trámite la solicitud de información faltante, solicitud de consulta pública, la realización de la consulta pública y la solicitud de información adicional.



Gráfica 15. Número de anomalías en términos de expedientes duplicados, resolutivos repetidos, resolutivos emitidos sin registro en Gaceta Ecológica del ingreso del trámite, proyectos registrados con claves distintas y proyectos a los que no se les asignó número de expediente.



Gráfica 16. Porcentaje de proyectos sometidos a evaluación para los que: (1) se llevó a cabo consulta pública, (2) se llevó a cabo la reunión pública de información, (3) la consulta pública fue solicitada y no otorgada, (4) la reunión pública de información fue solicitada y no otorgada y (5) para los que no hay registro de solicitud de consulta pública (este último resultado puede ser que simplemente no se registró en el historial del trámite o resolutivo la solicitud).

## 6. Discusión

Esta discusión se organiza con base en las preguntas de investigación.

### 6.1 ¿Qué constituye conocimiento útil para las transformaciones sostenibles en el contexto de la EIA?

Conocimiento útil para las transformaciones sostenibles en el contexto de la EIA es aquel que permite la formación de acuerdos “satisficientes” (satisfactorios y suficientes) durante la evaluación de riesgo de daño y daño significativo, sobre todo cuando los procesos de toma de decisiones están inmersos en conflictos y disputas ambientales asociados a la incertidumbre y complejidad inherente a los sistemas socioambientales. Un acuerdo satisficiente se basa en la racionalidad acotada de Herbert Simon (Simon, 1956) y se refiere a la exigencia práctica de buscar y seleccionar alternativas que cumplan con un umbral aceptable para las partes interesadas, en lugar de la búsqueda de la mejor solución posible (Dhami & Sunstein, 2022). Este concepto se contrapone con la visión de la ciencia positivista centrada en la generalización de conocimiento a través de la replicación empírica que no aborda adecuadamente los desafíos únicos y específicos a los problemas de sostenibilidad en diferentes contextos (Kempster & Parry, 2011). Los retos de la sostenibilidad abordados en la EIA requieren soluciones creíbles, relevantes y pertinentes para cada contexto mediante un enfoque pragmático, holístico y plural que reconozca la complejidad de los sistemas socioambientales (Cockburn, 2022; MacGillivray & Franklin, 2015).

### 6.2 ¿Qué constituye esencialmente un impacto ambiental?

La evaluación del impacto ambiental como instrumento de política ambiental es el procedimiento a través del cual la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) *establece las condiciones a que se sujetará la realización de obras y actividades que puedan causar desequilibrio ecológico o rebasar los límites y condiciones establecidos en las disposiciones aplicables para proteger el ambiente y preservar y restaurar los ecosistemas, a fin de evitar o reducir al mínimo sus efectos negativos sobre el medio ambiente* (LGEEPA, 1988). Como resultado de este trabajo, argumento que el ambiente se refiere al conjunto de elementos que conforman a un sistema socioambiental y que un impacto ambiental es negativo cuando las obras o actividades generan cambios (medidos como el riesgo o probabilidad de que ocurrirán en la EIA *ex ante* o de que ya ocurrieron en la EIA *ex post*) en

mecanismos causales que causan daño o daño significativo (sensu Acuerdo de Escazú, DOF, 2021) en el sistema socioambiental.

Si no se previene o mitiga el riesgo bajo el principio preventivo y precautorio en una EIA *ex ante* o no cesa, se recompone o resarce el daño y daño significativo minimizando el error de Tipo II en una EIA *ex post*, se contraviene el derecho constitucional a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar (Art. 4 CPEUM, 1917). En proyectos de infraestructura gris, es crucial retomar la teoría de conflictos y disputas ambientales dada la complejidad e incertidumbre de los sistemas socioambientales para identificar el riesgo de daño o daño significativo. Retomando el trabajo de (Crowfoot & Wondolleck, 2012) las disputas ambientales se generan cuando los resultados de la EIA (*ex ante* o *ex post*) resultan en un cambio significativo en el bienestar percibido de los actores sociales y partes interesadas como resultado de las afectaciones negativas al sistema socioambiental.

Metodológicamente, lo anterior implica que la conceptualización de un impacto ambiental debe partir de la formalización de las percepciones, perspectivas y conocimiento de expertos y las partes interesadas. Para ello, recorro a la axiomática de Bunge (cita) y que un impacto ambiental se formaliza como una proposición lógica del tipo  $P \rightarrow Q$  (que se lee “si P entonces Q”). En los dos artículos de esta tesis  $P \rightarrow Q$  implica la imposibilidad de establecer un impacto ambiental sin una causa específica. Puesto que la axiomática de Bunge es una forma didáctica para traducir conocimiento de todas las partes interesadas y no es indispensable su matematización, esta formalización únicamente gestiona el conocimiento de una forma inteligible y compatible con todos los métodos de evaluación del impacto ambiental (matrices de interacciones, modelos de simulación dinámica, análisis de redes, etc.). La aportación de esta definición es que no es suficiente inferir un impacto ambiental como se hace en una matriz de Leopold, sino que es necesario describir el mecanismo a través del cual se infiere el impacto.

Dado que una proposición lógica puede ser falsa o verdadera, propongo que un impacto ambiental dentro de un proceso administrativo o judicial pueda formularse como una presunción refutable, que establece el posible nexo entre las obras y actividades y el riesgo por daño o daño significativo en un sistema socioambiental. Una presunción refutable es una regla que establece cierta conclusión o inferencia sobre un hecho puede ser cuestionada o refutada mediante evidencia en contrario (análisis contrafactual) y ofrece una herramienta para ser usada en

procedimientos legales para determinar la carga de la prueba, evaluar el valor de la información proveniente de juicio de expertos y proveer elementos de responsabilidad por daño y daño significativo en la EIA *ex post*.

En la práctica, una presunción refutable como, por ejemplo, el vertimiento de aguas residuales sin tratar como resultado de obras y actividades (P) disminuye la calidad del agua (Q) tomaría forma dentro de una celda de una matriz de interacciones entre actividades de un proyecto y elementos del ambiente, como en la bien conocida Matriz de Leopold. El significado es que  $P \rightarrow Q$  se establece como verdadera y (1) daño o daño significativo (Q) es condición suficiente para atribuir la responsabilidad al agente causal (P), (2) la obra o actividad (P) es condición necesaria para un daño o daño significativo (Q), y (3) la ausencia del daño ( $\sim Q$ ) indica la inexistencia de la obra o actividad ( $\sim P$ ). El ejemplo anterior es por demás sencillo porque el vertimiento de aguas residuales está regulado por normas vinculantes que establecen legalmente la existencia de un impacto negativo específico. Un caso más complicado sería si se construye una vía ferroviaria en áreas con alto valor para la biodiversidad (P), entonces se deberán encontrar evidencias de riesgo de daño y daño significativo en los elementos ambientales susceptibles del sistema socioambiental (Q). En este caso, la presunción refutable se debe poner a prueba considerando la posibilidad de sobre determinación, o sea la posibilidad de  $\neg PVQ$  (V significa “o”) que significa la presencia del daño o daño significativo existe aún sin obras o actividades y que sucede por otras causas asociadas a la complejidad del sistema socioambiental. Además, se debe considerar que el daño y daño significativo incluye aspectos intangibles, ya que implica nociones subjetivas de riesgo e incluso diferentes cosmovisiones como el de poblaciones vulnerables y pueblos indígenas.

### **6.3 ¿Qué componentes criterios y atributos debería tener un sistema de conocimiento para la sostenibilidad para la gobernanza de la complejidad socioambiental en el contexto de la EIA?**

La respuesta de esta pregunta se contesta en la sección 2 de este documento.

### **6.4 ¿Por qué es necesario enmarcar el Acuerdo de Escazú en el sistema de conocimiento para la gobernanza de la complejidad socioambiental en el contexto de la EIA?**

El sistema de conocimiento que propongo busca avanzar la práctica de la EIA para las transformaciones sostenibles en tres frentes: gobernanza institucional, teórico-metodológico y

procesal-tecnológico. El frente de gobernanza institucional se enmarca con el Acuerdo de Escazú porque es el primer acuerdo internacional vinculante ratificado en México que acopla explícitamente los derechos humanos con asuntos ambientales, fortaleciendo al contexto institucional para cumplir con el derecho constitucional a un medio ambiente sano (DOF, 2021). Cabe señalar que este frente en mi trabajo no abarca la vinculación legal de los instrumentos normativos (leyes, reglamentos, normas, procedimientos administrativos y jurídicos) de los que depende que la EIA, dado que, el Acuerdo de Escazú provee una base robusta para guiar a la EIA como un instrumento para las transformaciones sostenibles. En otras palabras, el Acuerdo de Escazú abre oportunidades al imponer obligaciones a los Estados bajo el principio de no regresión y de progresividad de incorporar los principios descritos en el marco teórico de: igualdad y no discriminación, transparencia y rendición de cuentas, buena fe, preventivo, precautorio, equidad intergeneracional, máxima publicidad y *pro persona*. Estos principios son bases fundamentales reconocidas en el derecho internacional para avanzar al desarrollo sostenible.

### **6.5 ¿Cuál es la contribución del Observatorio de EIA al sistema de conocimiento?**

Algunos autores han identificado que en la actualidad no existen “*los mecanismos administrativos y judiciales para hacer [al Acuerdo de Escazú] efectivo y, en su lugar, prevalece la violación de los derechos humanos*” (Anglés Hernández, 2021) y que existe “*una incongruencia entre el marco legal nacional que solo podría ser resuelta en tribunales*” (CEMDA, 2022). Sin embargo, mi propuesta de sistema de conocimiento merece discutirse no solo desde la parte de gobernanza institucional. Basándome en el principio de progresividad (Art. 1 CPEUM, 1917) y del Artículo 35 BIS (LGEEPA, 1988), mi propuesta abre el cuestionamiento de cuál es el papel de las instituciones de investigación y educativas y la comunidad de expertos y practicantes en la incorporación de “*las mejores técnicas y metodologías existentes*” durante la ejecución de la EIA. El acuerdo de Escazú abre los espacios en el Artículo 10 de Fortalecimiento de capacidades en donde se reconoce “*la importancia de las asociaciones, organizaciones o grupos que contribuyan a formar o sensibilizar al público en derecho de acceso; y fortalecer las capacidades para recopilar, mantener y evaluar la información ambiental*”. Asimismo, en el Artículo 11 de Cooperación “*se promoverán actividades y mecanismos tales como: diálogos, talleres, intercambio de expertos, asistencia técnica, educación y observatorios; desarrollo, intercambio e implementación de materiales y programas educativos, formativos y de*

*sensibilización; intercambio de experiencias sobre códigos voluntarios de conducta, guías, buenas prácticas y estándares; y comités, consejos y plataformas de actores multisectoriales para abordar prioridades y actividades de cooperación.”* Con los Artículos 10 y 11 el Acuerdo de Escazú retoma de planeación y gobernanza colaborativa la necesidad de creación de procesos de acción conjunta entre las instituciones públicas y todas las partes interesadas para adaptarse conforme se genere nuevo conocimiento (Emerson et al., 2012). En mi trabajo, propongo que los componentes teórico metodológico y procesal tecnológico proveen soluciones basadas en teoría, métodos, procedimientos y tecnologías para avanzar en el acceso a la información, a la participación y la justicia ambiental.

En particular, con respecto al acceso a la información y la participación este trabajo ofrece un mecanismo específico para contribuir con los Artículos 10 y 11 mediante la creación de un Observatorio de EIA. Este observatorio evidencia algunas barreras de acceso a la información y participación en los últimos años (2002-2016) en proyectos de desarrollo turístico que se sintetizan a continuación:

### **Acceso a la información**

Los procedimientos de acceso a la información concerniente a la evaluación de manifestaciones de impacto ambiental proyectos es complicada hasta para los tecnócratas especializados en este campo de conocimiento. No hay un proceso automatizado de búsqueda de trámites por estado de la república o tipo de proyecto y la única forma de enterarse si un proyecto fue sometido a evaluación o si fue autorizado es mediante la revisión de la Gaceta Ecológica que se publica semanalmente en formato PDF. Una vez conocido el número de expediente asignado a un proyecto, las partes interesadas deben dar seguimiento diario al historial del trámite y conocer la ventana de tiempo asignada para solicitar una consulta y una reunión públicas de información. Estas solicitudes están incorporadas al Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Evaluación del Impacto Ambiental de manera independiente por la autoridad y pueden ser negadas sin justificación (Art. 41 y 43 RLGEEPA, 2000). Adicionalmente, en la mayoría de los casos, aunque esté disponible la manifestación de impacto ambiental, no incluye todos los anexos metodológicos que justificaron la determinación de la línea base y la evaluación de impactos y esta información solo se puede obtener de manera presencial en la biblioteca de la Dirección General de Impacto o Riesgo Ambiental (DGIRA) de



la SEMARNAT o en la Delegación de la SEMARNAT donde el proyecto se ejecutaría. Aunque se soliciten estos anexos información vía el portal de transparencia, la respuesta es comúnmente asistir presencialmente para fotocopiar las impresiones, ya que muchos de estos anexos no fueron compilados a ningún repositorio digital. Por lo tanto, en cuanto al acceso a la información, la EIA en México no cumple con los criterios de máxima publicidad, accesibilidad, transparencia, monitoreo, igualdad y no discriminación. Adicionalmente, no existe ningún seguimiento verificable de los proyectos una vez que fue emitido el resolutivo.

### **Acceso a la participación**

En cuanto al acceso a la participación la legislación no prevé mecanismos distintivos para abrir espacios si los proyectos son regionales o locales, financiados con recursos públicos o si son llevados a cabo en bienes nacionales. Adicionalmente, la EIA en México no cumple con los criterios de apertura e inclusividad, de difusión en lenguaje no técnico, comprensible, oportuno y en plazos razonables, y no hay ninguna transparencia o rendición de cuentas de cómo fue integrada la participación no solo de partes interesadas como ciudadanos, grupos vulnerables, organizaciones no gubernamentales y de la sociedad civil, pero de las mismas instituciones públicas a las que se les pidió retroalimentación como parte del proceso de evaluación.

### **Criterios de evaluación**

Los proyectos son evaluados de manera distinta por DGIRA o las 32 Delegaciones Estatales de la SEMARNAT. Esto se evidencia con (1) la discrepancia sustantiva en los tiempos de resolución dependiendo donde fue ingresada (de 11 a 1,400 días), (2) la discrepancia en la disponibilidad de las manifestaciones de impacto ambiental en el portal de la SEMARNAT, (3) la discrepancia en la disponibilidad de los resolutivos en el portal de la SEMARNAT, (4) la discrepancia en la integración del historial del trámite de los expedientes que componen el proceso de evaluación, (5) el desfase entre la fecha de ingreso de un trámite de evaluación y su publicación en la Gaceta Ecológica, (6) la discrepancia en la ausencia de la publicación de resolución en la Gaceta Ecológica, (7) la falta de disponibilidad de la información adicional solicitada, (8) el número de proyectos sin número de expediente y (9) la cantidad y distribución de proyectos que no fueron sometidos a consulta pública o reunión pública de información a pesar de que en varios casos fue porque no fue otorgada por la SEMARNAT.

Estos resultados confirman que la autoridad ambiental responsable de la evaluación de manifestaciones de impacto ambiental no cuenta con criterios unificados, homologados y abiertos al público para la construcción del historial del trámite, el proceso de evaluación y la emisión de resolutivos.

## **6.6 ¿En qué consiste la credibilidad de la EIA como sistema de conocimiento para la gobernanza de la complejidad socioambiental?**

La credibilidad corresponde en la confianza generada durante la generación del conocimiento. Consiste en demostrar que se utilizó la mejor ciencia durante la determinación del riesgo de que un impacto ocurrirá (EIA *ex ante*) o que ocurrió (EIA *ex post*). Para ello, el sistema de conocimiento incorpora tres atributos: pensamiento sistémico, calidad de las evidencias y valor de la información y gestión de riesgo e incertidumbre.

### **Pensamiento sistémico**

En el artículo *Analytic deliberation approach for collaborative determination of impact significance of projects in dispute*, el pensamiento sistémico fue la base para generar una métrica única de significancia que integra, sintetiza y traduce los impactos ambientales de distintos componentes del sistema socioambiental transformándolos a una escala común. En este artículo se reconoce que, aunque los impactos ambientales se pueden analizar de manera independiente, entender la influencia de los distintos impactos de distintos componentes en una entidad cartográfica permite ver su influencia y traducir mejor las implicaciones de un proyecto en su conjunto e identificar qué impactos contribuyeron a patrones específicos de significancia. El artículo hace referencia: “... *our approach addresses one ineluctable problem of EIA: in large and complex projects such as the one in our example, it is challenging to synthesize the massive amounts of information resulting from scoping and impact analysis in a way suitable for a broad interpretation by the public...*” [therefore] *Regarding the analytical component, it provides a procedure to combine the results of impact assessment into a single index, while addressing the inherent uncertainty of impact significance.*

En el artículo *What is evidence of environmental damage? Navigating expert judgment uncertainty*, el pensamiento sistémico fue la base para generar hipótesis utilizando campos de conocimiento interdisciplinarios e integrar la complejidad socioambiental mediante la incorporación de la axiomática. De esta forma se hicieron explícitos los elementos sociales y

biofísicos susceptibles a daño y daño significativo. El artículo hace referencia en el método: *“axiomatization serves as a fundamental analytical tool with several key purposes. It aids in organizing cause-effect propositions, providing justifications for postulates, and revealing hidden assumptions underlying hypotheses set  $\{H_i|H_1, H_2, \dots, H_n\}$ . Each hypothesis  $H_i$  is expressed using axioms (obvious initial assumptions that require no proof), definitions (propositions concerning the state of socio-environmental variables), and theorems (falsifiable propositions deduced from the axioms and definitions that describe a sequence of events). In the context of PEEIA, axioms correspond to non-rebuttable legal presumptions, definitions characterize depict systemic relations, and theorems take shape as rebuttable legal presumptions. Together, axioms, definitions and theorems constitute an explanatory hypothesis formally linking the cause and the evidence through a specific mechanism,  $H_i: C_i \rightarrow M_i \rightarrow E_i$ .*

### **Calidad de las evidencias y valor de la información**

Este atributo de la credibilidad busca asegurar que se incorpora información cuya validez debe ponerse a prueba a través proposiciones falsificables sobre los mecanismos causa-efecto que subyacen los impactos ambientales de las obras o actividades de un proyecto. En el artículo *Analytic deliberation approach for collaborative determination of impact significance of projects in dispute, a case study in Mexico*, el esquema de deliberación analítica propuesto obliga el contraste sistemático de los patrones de significancia en el territorio con base en las proposiciones sobre los mecanismos causa-efecto provistas por cualquier participante, independientemente de si fueron parte del equipo técnico, nivel académico o forma de expresión de su conocimiento. El artículo hace referencia en la discusión: *Our approach enabled the stakeholders to interchange their thoughts, opinions, or information and thus enriched the discussion of the factual merits of the perspectives portrayed in the spatial representations.* Asimismo, el método de clasificación difusa de patrones propuesto previene que se utilicen técnicas que oscurecen la determinación de la significancia mediante esquemas arbitrarios de clasificación. El artículo hace referencia en la discusión: *In this respect, we contend that the use of our approach fulfills one important role in analytic deliberation. The use of a posteriori category cuts prevents the onset of what (Duncan & Lach, 2006) refer to as the “map tyranny” of expert knowledge that conceives participants as passive receivers of information. On the contrary, the exploration of all possible outputs of FPC [Fuzzy Pattern Classification] turns*

*participants into active agents in the determination of the most meaningful spatial representation of impact significance.*

En el artículo *What is evidence of environmental damage? Navigating expert judgment uncertainty*, la calidad de evidencias y valor de la información se evaluó explícitamente mediante el razonamiento abductivo e inferencia contrafactual para seleccionar la mejor explicación de un conjunto de hipótesis posibles sobre el nexo causal entre el daño ambiental y la contingencia ambiental. Como se hace referencia en el artículo, *“Abductive reasoning, also known as “inference to the best explanation,” is a logical process to find the simplest and most likely conclusion based on incomplete information and uncertainty (Bromley, 2008). It entails working backward from observed evidence to generate hypotheses about the cause of an event. The objective is to provide an explanation for the event’s cause, even if the explanation remains conjectural and fallible (Ansell & Boin, 2017). The process involves evaluating a set of hypotheses or conjectures regarding the liability of an agent and selecting the one that constitutes the best justification for believing in the existence of a causal effect (Lipton, 2017). Abductive reasoning is particularly valuable in situations characterized by uncertainty and the challenges of underdetermination and overdetermination (Behfar & Okhuysen, 2018). These challenges arise when the available evidence does not conclusively determine a single explanatory mechanism, or multiple mechanisms may potentially account for the observed phenomenon”.*

*Factual causation necessitates the use of counterfactual inference to identify the causally relevant mechanism among a set of possible scientific explanations (Lewis, 1973, 2000). Counterfactual inference involves stating that If C (the putative cause) had not occurred, then E (the effect) would not have occurred. It involves examining whether, when, and how one event occurs in relation to whether, when, and how another event occurs (Menzies, 2017)”.*

### **Gestión de riesgo e incertidumbre**

La gestión de riesgo e incertidumbre se atendió en ambos artículos mediante procedimientos que minimizan sistemática y rigurosamente los errores de tipo II, es decir, evitar omisiones en la detección o predicción de daños o daños significativos. Estos procesos obligan a los participantes a justificar sus juicios sobre la valoración de las métricas para evaluar los impactos al proveer explicaciones coherentes apoyadas en la información disponible, a la vez que permiten reconocer cuando ésta no es suficiente.

En el artículo *Analytic deliberation approach for collaborative determination of impact significance of projects in dispute*, la incertidumbre se abordó minimizando los errores de tipo II de tres formas. En el componente analítico del método, la primera incorpora una métrica de controversia que exagera sistemáticamente los impactos cuando existen razones subjetivas que potencialmente aumentan los efectos tangibles sobre el sistema socioambiental. La segunda consistió en anclar las métricas a una escala relativa de magnitud máxima de impacto al sistema ambiental regional. Esto significó, por ejemplo, que la magnitud del impacto en las selvas afectadas por las obras y actividades del proyecto, se calificaron tomando como base a ecosistemas similares dentro de una zona núcleo de un área natural protegida cercana. En el artículo se hace referencia en la discusión: *The interdisciplinary team then explained how the interaction intensity index incorporated the uncertainty of the input data (through ad hoc value functions and the indicator controversy), and facilitators centered the deliberation on finding the representations that accommodated such uncertainty while avoiding an oversimplification of impact significance by making all land units VH. After pondering the evidence provided, the representative of conservationists acknowledged that additional biodiversity data would not improve the outcome of the determination of impact significance.* La tercera es mediante la incorporación de la lógica difusa con equivalencias en categorías lingüísticas en la generación de la métrica de significancia. En el artículo se menciona: *Our approach simplifies the exploration of how epistemic and linguistic uncertainty shape either convergence or divergence of judgments about contested impacts while enabling transparent and auditable impact assessment.*

En el artículo *What is evidence of environmental damage? Navigating expert judgment uncertainty* se reconocieron las distintas formas de incertidumbre: *We agree with (Foster, 2011) on the importance of considering multiple sources of uncertainty in adjudication proceedings. Our approach specifically tackles the epistemic and linguistic uncertainties that commonly arise in the adjudication process. Epistemic uncertainty pertains to imprecise data regarding the presence of the causal agent, while linguistic uncertainty emerges from experts' inclination to utilize ambiguous and vague judgments, such as "the worst environmental disaster," "inexplicable environmental damage", or "the damage was contained." Furthermore, our approach also addresses what (McGoey, 2007, 2012) describes as the institutional "will of ignorance," which occurs when regulatory agencies and academic institutions may restrict the scope of an assessment by underplaying the uncertainty associated with expert judgments*

[politically induced uncertainty]. *Specifically, we have shown the advantages of developing mechanism-based explanations that provide scientifically sound justifications regarding the veracity of the causal link between the observed environmental damage and the tortfeasor's actions (or inactions).*

Asimismo, se incorporó el riesgo inductivo, o la probabilidad de aceptar o rechazar hipótesis basados en la evidencia disponible, comúnmente conocidos a los errores estadísticos de tipo I y II (Hempel, 1965) de la siguiente manera: *It involves considering confirmation and acceptance rules (Biddle, 2016; Douglas, 2000). Confirmation rules concern whether the evidence E is enough to warrant the acceptance or rejection of the hypothesis H. This determination is contingent upon the potential consequences of making an erroneous decision and, thus, a higher degree of confirmation should be demanded when the environmental damages at stake are substantial.*

*Rules of acceptance encompass the level of robustness required for evidence E to justify the acceptance of hypothesis H. This determination considers broader societal consequences beyond statistical or epistemic errors. They incorporate ethical, non-epistemic factors as legitimate considerations in deciding whether to accept or reject H. For example, the principle of in dubio pro natura can be applied to minimize the possibility of inadequate compensation for the cost imposed on society by tortious conduct. By applying this principle, the focus is placed on erring on the side of caution and taking into account the long-term and indirect consequences of tortious conduct. This ensures that potential costs and damages are neither underestimated nor neglected.*

### **6.7 ¿En qué consiste la relevancia de la EIA como sistema de conocimiento para la gobernanza de la complejidad socioambiental?**

La relevancia o pertinencia consiste en demostrar que los productos de la investigación científica responden a las necesidades particulares de conocimiento de los asuntos a resolver. Se consideraron cuatro atributos provenientes de la epistemología pertinentes para las ciencias de la sostenibilidad y que incluyen: pluralismo, pragmatismo, holismo y virtuosismo.

## Pluralismo

El pluralismo implica respetar las formas múltiples de describir la realidad, pero condicionado a rechazar el relativismo ingenuo que impide la formación de acuerdos. El pluralismo epistemológico obliga a manejar la incertidumbre y asegurar la calidad del conocimiento mediante la inclusión de perspectivas plurales. Esto es, abrir procesos de diálogo genuino a las partes interesadas en un proceso de toma de decisiones como parte del proceso de validación de conocimiento. En el artículo *Analytic deliberation approach for collaborative determination of impact significance of projects in dispute*, se incorporaron formalmente las perspectivas y conocimiento plural durante la determinación colaborativa de la significancia de impactos ambientales. Las perspectivas se incorporaron metodológicamente mediante las tablas de decisión y la deliberación conjunta de los umbrales mediante la modificación del factor de progresión (PF) de lo que implica espacialmente la significancia de impactos de un proyecto. La perspectiva conservacionista corresponde a una posición que busca minimizar los errores de omisión. La perspectiva desarrollista corresponde a una posición que busca minimizar los errores de comisión. En el artículo se aborda en la discusión: *The integration of data and knowledge is straightforward in our approach. Users alternate between decision tables and PF values to visualize how their viewpoints generate different categorizations of impacts across the land units.*

*Another challenge in EIA concerns the uncertainty inherent in the interpretation of impact significance. Drawing from Lawrence (2007b), we contend that the use of our approach enables a productive engagement between participants and experts during deliberation. In other words, participants and experts play different but complementary roles when addressing such uncertainty: the role of participants is to interpret the connotation of the spatial representations according to their subjective values, insights, and knowledge, while the role of experts is to support the participants' arguments with technical information concerning the interaction intensity and environmental vulnerability indices. Accordingly, an agreement on a spatial representation is the outcome of a collective discussion and reflection about the different perspectives that arise from values and uncertainties associated with a project.*

En el artículo *What is evidence of environmental damage? Navigating expert judgment uncertainty*, el pluralismo fue fundamental para la generación del conjunto de hipótesis alternativas que explican el posible nexo causal entre daño ambiental y una contingencia

ambiental. El artículo hace referencia: *during axiomatization, the analysis of expert judgments led to the identification of 11 concepts, 10 axioms, and 6 theorems (Tables 3-5). The formal mechanism-based explanations, M, provided scientifically acceptable beliefs about the truth of the hypotheses, H<sub>i</sub>, linking the spill to environmental damage (Table 6). To account for the socioenvironmental heterogeneity of the watercourse, a set of homogeneous zones or settings, denoted as {S<sub>k</sub>|S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, ..., S<sub>n</sub>}, k = 1,2, ..., n, n = 4, was identified (Figure 2). In each setting S<sub>k</sub>, hypothesis H<sub>ik</sub> involving mechanism M<sub>ik</sub> may provide the best explanation for evidence E<sub>k</sub> but not necessarily in setting S<sub>l</sub> for evidence E<sub>l</sub>, k ≠ l*

En particular, la sección 4.2.2 y 4.2.3 en la que se contrastan hipótesis que requirieron la evaluación de conocimiento incierto de un sistema socioambiental altamente complejo.

### **Pragmatismo**

El pragmatismo epistemológico en el contexto de la EIA se refiere a la representación de la realidad relacionada con el significado de un impacto ambiental en relación con la incertidumbre inherente a la complejidad de los sistemas socioambientales. En este sentido, se debe contestar los aspectos dentro de un proceso de evaluación de impacto ambiental son más importantes de explicar. Adicionalmente, en el pragmatismo no se busca cuál es el mecanismo más verdadero, sino aquel que basado en las mejores evidencias tiene el mayor potencial de generar acuerdos. El pragmatismo entonces provee los estándares para determinar qué verdad entre un conjunto de posibles verdades es la que constituye el conocimiento válido para generar acuerdos reconociendo la incertidumbre de los sistemas socioambientales inmersos en procesos de gobernanza altamente complejos.

En el artículo *Analytic deliberation approach for collaborative determination of impact significance of projects in dispute*, el pragmatismo fue fundamental para determinar: (1) cuáles fueron los impactos ambientales más relevantes para todas las partes interesadas y (2) qué representación espacial de significancia de impactos permitió la formación de acuerdos en un proyecto en disputa como insumo para generar consensos sobre las medidas de prevención, mitigación y compensación para atender la significancia. En el artículo se aborda en la discusión: *[our approach] should be viewed as a means to direct deliberation to the most important and contentious issues and concerns for the stakeholders. ...The outcome should be a compromise on the best representation of impact significance, as the basis for agreement on the appropriate*



*prevention, mitigation, and compensation measures of a project. ... This understanding is fundamental for settling the unavoidable environmental disputes of socio-environmentally complex projects.*

En el artículo *What is evidence of environmental damage? Navigating expert judgment uncertainty* se generó una métrica (valor de la información) para comparar las hipótesis e identificar la mejor explicación del nexo causal entre ellas incluyendo la consideración de valores no epistémicos como *in dubio pro natura*. Esta métrica se aborda la sección metodológica del artículo pero se sintetiza en la conclusión: *Our approach focuses on assessing the information worth of candidate hypotheses that establish the causal nexus between evidence of environmental damage and the responsible party. Through the integration of axiomatization, [Weight of Evidence] (WoE) [a Bayesian method used to update prior information based on available evidence], [Clairvoyance Analysis] (CA) [a method to evaluate the worth and reliability of expert judgment, providing insights into the quality and credibility of the proposed hypotheses], and the consideration of inductive risk [the probability of incorrectly accepting or rejecting the hypothesis based on the available evidence], our approach strengthens the overall efficacy and robustness of abductive reasoning in the adjudication process. Axiomatization provides a structured and logical framework for analyzing expert judgments and refining the understanding of underlying causal mechanisms. This systematic approach ensures a comprehensive evaluation of the available evidence and expert judgments. The WoE and CA methodologies further contribute to a thorough assessment of the evidence, facilitating the identification of the most compelling hypotheses. Additionally, the consideration of inductive risk acknowledges the importance of balancing the consequences of both false positive and false negative outcomes in minimizing the potential of erroneous assessment of hypotheses.*

### **Holismo**

El holismo presupone que el conocimiento no es aislado, sino que corresponde a redes conectadas de conocimiento (formal y no formal), que no pueden separarse de las creencias de las comunidades que usan dicho conocimiento. El holismo precisa que la interpretación de un impacto ambiental debe involucrar a las partes interesadas y reconocer que en cualquier proceso de generación de conocimiento útil no pueden ignorarse las percepciones, sesgos, creencias, valores y perspectivas de las comunidades que contribuyeron a crearlo.

En ambos artículos se incorporó de manera sistemática, plural y pragmática las teorías de distintas fuentes de conocimiento que en su conjunto conforman lo que constituye un impacto ambiental. En el artículo *Analytic deliberation approach for collaborative determination of impact significance of projects in dispute*, por ejemplo, para determinar el valor de la biodiversidad en las entidades cartográficas del proyecto se incluyeron conceptos de ecología del paisaje, biogeografía, ecología de poblaciones, ecología de comunidades, ecología costera, botánica, zoología, biología de la conservación, vulnerabilidad, complejidad, resiliencia y geografía ambiental. Sin embargo, se dejó fuera la micología, ecología microbiana, ecología evolutiva, ecología funcional y muchos otros campos de conocimiento que no se consideraron relevantes por las partes interesadas. En el artículo se aborda en la discusión: *Analytic deliberation has been defined as the process to gain a better understanding of socio-environmental issues and concerns and to reach an agreement among stakeholders* (Akamani et al., 2016; Dietz, 2013; Dietz & Stern, 1998; Gunderson, 2018; National Research Council, 1996) *The analytical component is achieved by systematically applying scientific theories and methods. The deliberation component is achieved by discussing the inevitable conflicts of judgments and values that offer insights and knowledge into the issues of concern.*

En el artículo *What is evidence of environmental damage? Navigating expert judgment uncertainty*, para generar las hipótesis de defaunación se incluyeron conceptos de hidrología de cuencas, química inorgánica, química bio-inorgánica (biodisponibilidad, bioacumulación, biomagnificación, removilización), vulnerabilidad, biología de la conservación, ecología de poblaciones, biogeografía, complejidad, geoestadística etc. Sin embargo, se dejó fuera la salud humana, ecología microbiana, evolutiva y funcional y muchos otros campos de conocimiento que no se consideraron relevantes por las partes interesadas.

En ambos casos, se reconoce que el conocimiento generado responde a las necesidades particulares de conocimiento de los asuntos a resolver al momento de la realización de los estudios, pero sus alcances dependen de las partes interesadas, por lo que éstas se deben ampliar y ser lo suficientemente incluyentes para disminuir la posibilidad de dejar fuera aspectos cruciales del sistema socioambiental.

## Virtuosismo

La epistemología de las virtudes dicta la manera en que las proposiciones emitidas por un experto se deben evaluar y falsificar. Esto es, un juicio de expertos y partes interesadas sobre un impacto ambiental es válido si las predicciones no son sólo exactas (pragmáticamente verdaderas) y competentes (toman en cuenta las evidencias apropiadamente), sino además son idóneas (que el resultado no es por mera suerte). El virtuosismo reconoce que una proposición  $P \rightarrow Q$  resulta válida si y sólo si corresponde al juicio de expertos cuya veracidad no se debe al azar. Así, el juicio experto que debe incorporarse a la evaluación del impacto ambiental es aquel que permite conscientemente identificar el riesgo a las afectaciones verdaderas y deben rechazarse aquellos juicios que justifican o confirman posiciones preconcebidas.

En el artículo *Analytic deliberation approach for collaborative determination of impact significance of projects in dispute*, el virtuosismo se incorporó mediante el proceso heurístico de deliberación en el que se fueron descartando sistemáticamente las representaciones que no fueran exactas, competentes e idóneas de la siguiente manera: *The deliberation process consists in evaluating each spatial representation based on the insights, evidence, and knowledge of the participants and spatial representations are heuristically ruled out solely based on reason. As a heuristic process, deliberation starts with the participants judging the accuracy of the distribution of impact significance for each spatial representation. Thus, deliberation entails a recursive process of elimination in which participants systematically search for the “factually competent” (sensu Dietz, 2013) spatial representation that correctly reflects the common understanding of the distribution of impact significance. Deliberation ends when the new collective knowledge and understanding allow for an agreement on the factually competent spatial representation that should be used for the design of a feasible prevention, mitigation, and compensation strategy.*

En el artículo *What is evidence of environmental damage? Navigating expert judgment uncertainty*, el virtuosismo se reflejó en la evaluación de los nexos causales de cada una de las hipótesis para establecer la mejor explicación para las evidencias de daño encontradas incluyendo aquellos en los que la reversión de la carga de la prueba es necesaria. En el artículo se aborda en la discusión: *Our approach not only helps determine whether the alleged environmental damage can be attributed to the tortfeasor or is a result of overdetermination but also assists in*

*establishing the burden of proof. In our illustrative example, the results demonstrate that the acceptance of hypothesis  $H_{1,1}$  poses no issues as it aligns with causal minimalism. This acceptance corresponds to the upper limit of clairvoyance. On the other hand, the acceptance of hypotheses  $H_{2,1}$  and  $H_{3,1}$  implies the liability of KKMC for the environmental tort. Consequently, the burden of proof rest with KKMC to demonstrate the lack of a causal nexus between the spill and the alleged mortality of forest stands in site  $S_2$ , as well as the absence of juveniles in fish populations in site  $S_3$ . On the other hand, the evidence  $E_4$  suggests overdetermined causation, specifically involving contaminated water from abandoned mines flowing into the reservoir through numerous streams, while the plume has already diluted. Accordingly, accepting hypothesis  $H_{4,2}$  as the best explanation for  $E_4$  indicates that KKMC is not liable. Consequently, the burden of proof regarding the causal nexus between the spill and environmental damage at site  $S_4$  lies with the environmental authorities.*

## **6.8 ¿En qué consiste el empoderamiento de la EIA como sistema de conocimiento para la gobernanza de la complejidad socioambiental?**

El empoderamiento en la EIA como sistema de conocimiento presupone que se cumplen con tres condiciones esenciales para que la identificación y la valoración de la significancia de los impactos ambientales sea útil para la gobernanza: inteligibilidad, portabilidad y racionalidad.

### **Inteligibilidad**

El objetivo de la inteligibilidad es incorporar procedimientos que ayudar a comprender, integrar y sintetizar el conocimiento a manera de hacerlo accesible e informativo a las partes interesadas. En el artículo Analytic deliberation approach for collaborative determination of impact significance of projects in dispute, la inteligibilidad fue incorporada al sintetizar las docenas de indicadores en una sola métrica de significancia por entidad cartográfica. Por consiguiente, el análisis de significancia de impactos no se redujo a una representación fragmentada de los efectos individuales de cada obra o actividad. Al contrario, la inteligibilidad se logró al generar representaciones espaciales para todas las perspectivas posibles de la significancia de impactos. Como la determinación de la significancia se hizo de manera colaborativa con todas las partes interesadas, se evitó que el resultado se derivara de nociones preconcebidas, sesgos disciplinarios y enfoques reduccionistas. Al hacer accesible las bases de conocimiento que conforman la significancia de impactos a través de un proceso interactivo e

iterativo, se fomentó la comprensión de las implicaciones de las obras y actividades del proyecto sin dejar de justificar las razones específicas que subyacen los patrones espaciales.

La inteligibilidad se construyó colectivamente con la deliberación analítica para obtener la mejor representación de significancia con base en el conocimiento de los participantes, lo que permitió acuerdos específicos sobre las medidas de prevención, mitigación y compensación que se debían incorporar independientemente. En el artículo se aborda en la discusión: *Regarding translation, our approach addresses one ineluctable problem of EIA. In large and complex projects such as the one in our example, it is challenging to synthesize the massive amounts of information resulting from scoping and impact analysis in a way suitable for a broad interpretation by the public. In this respect, our approach displays the results of impact analysis in a non-technical format that is understandable to laypeople. Analogous to findings, moreover, the fuzzy pattern classification algorithm (Wood et al., 2007) effectively captures the vague and subjective character of natural language and enables better communication of judgments about the circumstances in the land units. The spatial representations of our approach thus simplify a systematic interpretation of otherwise cryptic appraisals of impact significance.*

En el artículo *What is evidence of environmental damage? Navigating expert judgment uncertainty*, la inteligibilidad se logró mediante la axiomatización y la inferencia contrafactual. De acuerdo con (Bunge, 2001, 2017) la axiomatización es una herramienta didáctica de formalización de conocimiento de distintas disciplinas que sirve a la construcción de explicaciones coherentes a partir de las evidencias disponibles. La inferencia contrafactual facilitó la obtención de la justificación de los mecanismos causales relevantes entre un conjunto de posibles explicaciones científicas. En el artículo se aborda: *The implementation of the approach begins with the axiomatization of the candidate hypotheses and causal mechanisms linking the alleged causal agent and the observed environmental damage. Axiomatization is a formal method to delineate the content of scientific explanations whose status is conjectural. Its primary objective is to foster a logical and fact-based rationale while circumventing the utilization of intuitive or heuristic formulations of causal theories that could inadvertently incorporate erroneous or false assumptions (Bunge, 2001, 2017). Essentially, axiomatic reasoning supplants intuitive constructs with concrete system-based explanatory mechanisms (Bunge, 2000, 2004). Therefore, scientifically valid beliefs regarding the truth of a hypothesis  $H_i$  are expressed in terms of a specific mechanism-based explanation,  $M_i$ .*

*In our approach, axiomatization serves as a fundamental analytical tool with several key purposes. It aids in organizing cause-effect propositions, providing justifications for postulates, and revealing hidden assumptions underlying hypotheses set  $\{H_i|H_1, H_2, \dots, H_n\}$ . Each hypothesis  $H_i$  is expressed using axioms (obvious initial assumptions that require no proof), definitions (propositions concerning the state of socio-environmental variables), and theorems (falsifiable propositions deduced from the axioms and definitions that describe a sequence of events). In the context of PEEIA, axioms correspond to non-rebuttable legal presumptions, definitions characterize depict systemic relations, and theorems take shape as rebuttable legal presumptions. Together, axioms, definitions and theorems constitute an explanatory hypothesis formally linking the cause and the evidence through a specific mechanism,  $H_i: C_i \rightarrow M_i \rightarrow E_i$ . Inference involves applying WoE and CA to evaluate and compare each hypothesis in the set  $\{H_i|H_1, H_2, \dots, H_n\}$  and determine the one that provides the best explanation for the evidence of environmental damage.*

## **Portabilidad**

El objetivo de la portabilidad es traducir, estandarizar conceptos, instrumentos, prácticas y tecnologías a distintas esferas con el fin de facilitar la comunicación y disseminación de conocimiento y tecnologías.

En el artículo *Analytic deliberation approach for collaborative determination of impact significance of projects in dispute*, la portabilidad fue incorporada mediante: (1) la estandarización de todos los indicadores usados para la evaluación del impacto ambiental a una escala común para poder compararse entre sí, independientemente de los campos de conocimiento de los que provenían, (2) la estandarización en la integración de los índices de impacto y vulnerabilidad por entidad cartográfica, (3) el desarrollo de un sistema de soporte de decisiones apoyado por la geovisualización (*SIGNificance*) como la herramienta tecnológica diseñada para facilitar la construcción colectiva de conocimiento y (4) la estandarización de la deliberación analítica en la determinación de la significancia en la EIA como el mecanismo para la formación de acuerdos.

En el artículo se aborda la estandarización de las métricas y los índices de impacto y vulnerabilidad: *The interdisciplinary team of specialists then assesses the minimum set of impacts using two indexes: (1) interaction intensity and (2) environmental vulnerability. The interaction*

*intensity index may include variables magnitude, spatial extent, duration, cumulative effects, reversibility, synergy, and controversy. This index can be implemented through an assortment of methods, such as Bojorquez-Tapia et al. (2002), Canter and Hill (1979), Dee et al. (1973), and Ijäs et al. (2010). The vulnerability index may include variables susceptibility, exposure to harm, and resilience of an environmental component. This index can be implemented by adapting the methods such as Adger (2006), Eakin and Luers (2006), or Pavlickova and Vyskupova (2015). Both indexes are applied to a finite set of geographic entities to include spatial heterogeneity in the impact assessment. Value functions need to be applied to ensure the indices are commensurate with a [0,1] ratio scale in which 0 corresponded to the minimum impact or vulnerability and 1 to the maximum (Beinat, 1997; Canter and Hill, 1979).*

*Analysis then consists of the systematic combination of the interaction intensity and environmental vulnerability indexes for the minimum set of impacts. The results are aggregated into categories of impact significance for every geographic entity. This is achieved through a fuzzy pattern classification algorithm (FPC) (Bojadziev and Bojadziev, 1995; Bojorquez-Tapia et al., 2009; Cox, 1994; Kosko, 1992; Miller, 1956; Terano et al., 1989, Wood et al. 2007). Computationally, FPC entails (1) categorization, (2) fuzzification, (3) inference, (4) combination, and (5) defuzzification (Appendix 1). FPC included the following categories of impact significance {VL (very low), L(low), M(moderate), H(high), VH(very high)}.*

*En el artículo se aborda el desarrollo del sistema de soporte de decisiones: Translation consists in using the web-based application SIGnificance to present the output of FPC as spatial representations in an understandable and accessible way (Figure 2). The interactive and iterative operation of SIGnificance enables users to gain a better understanding of the relationships between the geographic context and the spatial distributions of impact significance in a territory. SIGnificance allows for the selection of base maps (satellite map, street view, elevation model) as well as the visualization of the blueprint for the construction or operation of a project. Also, it allows for (1) the visualization of the geographic entities (such as land units) used to represent the spatial heterogeneity of a project's impacts; (2) the visualization of different configurations of inputs (decision tables and PF) and (3) the interactive exploration of the resulting spatial representations. SIGnificance displays a spatial representation (a map) of the overall results, in which each geographic entity is classified according to the impact significance. The color palette*

*in SIGNificance is the internationally known traffic light pattern to simplify the identification of impact significance across space.*

En el artículo se aborda la estandarización de la deliberación analítica: *As a heuristic process, deliberation starts with the participants judging the accuracy of the distribution of impact significance for each spatial representation. Thus, deliberation entails a recursive process of elimination in which participants systematically search for the “factually competent” (sensu Dietz, 2013) spatial representation that correctly reflects the common understanding of the distribution of impact significance. Deliberation ends when the new collective knowledge and understanding allow for an agreement on the factually competent spatial representation that should be used for the design of a feasible prevention, mitigation, and compensation strategy.*

En el artículo *What is evidence of environmental damage? Navigating expert judgment uncertainty*, la portabilidad se llevó a cabo mediante: (1) la estandarización de las probabilidades subjetivas mediante el uso de expresiones lingüísticas asociadas a la escala fundamental de Saaty, (2) la estandarización de la métrica de valor de la información de cada hipótesis y (3) el uso de valores no epistémicos asociados al riesgo inductivo. La estandarización de las probabilidades subjetivas se abordan: *Confidence and plausibility can be understood as expressions that capture the inherent uncertainty associated with making inferences about causal claims. From a Bayesian modeling perspective, they correspond to subjective probabilities that quantify the belief regarding the association between the causal agent and environmental harm. It is important to note that subjective probabilities are influenced not only by the available evidence but also by the knowledge and information at hand. Consequently, the process of eliciting these probabilities inevitably involves certain degree of vagueness (Good, 1988) that arises from the ambiguous and polysemous nature of linguistic expressions typically used by experts to convey uncertainty (Morgan, 2014). Drawing from Wallsten et al. (1986), we employ a degree of belief linguistic scale to account for the uncertainty of evidence and the vagueness of expert judgment (Table 2). This linguistic scale serves as a representation of how experts psychologically convey the relative strength of their beliefs. Each linguistic variable (Zadeh, 1975) offers an approximate characterization of a complex, uncertain, and ill-defined causality that cannot be precisely described quantitatively. To transform these linguistic variables into subjective probabilities, we used the reciprocal matrix method. This method involves solving the principal eigenvector of a  $n \times n$  reciprocal matrix of verbal probabilistic expressions associated with a numerical scale*



*(Hughes, 1993; Jensen, 1981; Tavana et al., 1997; Yager, 1979). Operationally, this transformation is achieved by means of Saaty's (1980) Analytic Hierarchy Process (AHP).*

La estandarización de la métrica de valor de la información de cada hipótesis se aborda: [Clairvoyance análisis] *CA provides a benchmark for ascertaining the information value or worth of expert judgment in abductive reasoning. The worth of a "clairvoyant" or expert is closely tied to his/her capacity for enhance expectations regarding future events, such as achieving a fair adjudication (Howard, 1966; Mock, 1971). Because CA is related to the concept of inductive risk, we define clairvoyance as the information value or worth of expert judgment,  $IV(H|E\&M)$ , in relation to type-I and type-II errors. Thus, the expected clairvoyance is determined by the difference between the false positive rate and the false negative rate (FPR-FNR).*

El uso de valores no epistémicos se aborda: *Rules of acceptance encompass the level of robustness required for evidence E to justify the acceptance of hypothesis H. This determination considers broader societal consequences beyond statistical or epistemic errors. They incorporate ethical, non-epistemic factors as legitimate considerations in deciding whether to accept or reject H. For example, the principle of in dubio pro natura can be applied to minimize the possibility of inadequate compensation for the cost imposed on society by tortious conduct. By applying this principle, the focus is placed on erring on the side of caution and taking into account the long-term and indirect consequences of tortious conduct. This ensures that potential costs and damages are neither underestimated nor neglected.*

El empoderamiento está altamente relacionado con la coproducción de conocimiento, la cual, de acuerdo con (Jasanoff, 2004), es una expresión idiomática que se refiere a las nuevas representaciones de la realidad que resultan de procesos colaborativos. Siguiendo este mismo razonamiento, Jasanoff propone que estas nuevas representaciones al ser apropiadas por las partes interesadas pueden en sí mismas aumentar la inteligibilidad y portabilidad de conocimiento.

### **Racionalidad**

Los tres tipos de racionalidad que son relevantes en la EIA (instrumental, acotada o práctica y expresiva) tienen como propósito mejorar la forma de argumentación sobre los impactos ambientales. Se propone que incorporar formalmente la racionalidad es indispensable en condiciones de alta incertidumbre y disputas ambientales. Esta argumentación requiere un razonamiento sólido y justificaciones que puedan resistir el escrutinio de las partes interesadas.

Cualquier afirmación que no pueda apoyarse en un argumento transparente y bien fundamentado se consideraría irracional. Esto permite la eliminación de opiniones sobre los efectos de una actividad o proyecto que no se puedan justificar racionalmente.

En el artículo *Analytic deliberation approach for collaborative determination of impact significance of projects in dispute*, la racionalidad se aborda en la discusión: *We argue in line with Alexander (2000) and Elling (2009) that rationality is tantamount to accountability. It follows that rationality (in its diverse forms: cognitive–instrumental, moral–practical, and aesthetic–expressive) is essential to neutralize the dark side, under the pragmatic Habermesian perspective proposed by Stein and Harper (2003). Accordingly, the main purpose of a safe space for analytical deliberation is to foster a rational, reasonable, and fair impact assessment process. In this regard, it is relevant to consider the different types of power identified by Avelino (2021): “power over” (coercion and manipulation), “power to” (resistance and empowerment), and “power with” (cooperation and learning). Hence, we maintain that one cardinal function of SIGNificance is to help prevent that impact assessment switches from a process based on rational argumentation (power with) to one distorted by coercive actions of the authorities and hegemonic agents (power over) or antagonistic positions of the stakeholders (power to). In the illustration of our approach, we have shown how our approach can be used to identify spatial patterns that are justifiable on reasonable grounds and arguments versus those that cannot.*

En el artículo *What is evidence of environmental damage? Navigating expert judgment uncertainty*, se abordan la racionalidad instrumental y la expresiva. En el caso de la racionalidad instrumental, el único caso en el que se puede utilizar es cuando se presupone que se cuenta con información completa mediante el análisis contrafactual del minimalismo causal, de la siguiente manera:

*Inference for  $S_1$  concerns the causal minimalist counterfactual but-for the spill, environmental damage would have not occurred. This counterfactual inference gives rise to the hypothesis set  $\{H_{1,1}\}$ . Hypothesis  $H_{1,1}$  posits that the spill is the cause-in-fact of environmental damage in  $S_1$ . It is derived from theorem T1 and implies mechanism  $M_{1,1}$  (Tables 3-6).*

*The confidence is considered beyond doubt ( $\alpha_c = 9$ ) and the plausibility is considered conclusive ( $\alpha_p = 9$ ). These judgements result in maximum clarity and minimum inductive risk*

(FNR). According to CA, therefore,  $H_{1,1}$  should be accepted as the best explanation for  $E_1$  (Tables 2, 7).

Respecto a la racionalidad expresiva, las distintas formas de interpretar las evidencias de daño ambiental por el derrame se reflejan en el análisis contrafactual NESS, por ejemplo, *the spill is a necessary element within the set of antecedent conditions (such as drought, disease, and exposure of sensitive natural elements) jointly sufficient to cause the observed high mortality of forest stands in the affected watercourse*. Este contrafactual se traduce en hipótesis alternativas que se someten a un proceso de inferencia abductivo que da como resultado:

*The confidence for both hypotheses is considered preponderant ( $\alpha_c = 7$ ). The plausibility is considered convincing ( $\alpha_p = 5$ ) for  $M_{2,1}$  and somewhat conceivable ( $\alpha_p = 2$ ) for  $M_{2,2}$ . These judgments suggest that both hypotheses could be accepted. Nevertheless, the level of clarity is higher and the inductive risk lower for  $H_{2,1}$  than for  $H_{2,2}$ . According to CA, therefore,  $H_{2,1}$  should be accepted as the best explanation for  $E_2$  (Tables 2, 7).*

## **6.9 ¿Qué métodos contribuyen a la EIA para que sea más eficaz y efectiva como sistema de conocimiento para la gobernanza de la complejidad socioambiental?**

La eficiencia y eficacia de una EIA en el marco de un sistema de conocimiento depende de la sistematicidad y replicabilidad del proceso de análisis de impactos ambientales, el cual depende del rigor metodológico de los procedimientos analíticos.

### **Sistematicidad y replicabilidad**

La sistematicidad y replicabilidad en los dos artículos se logra mediante la incorporación de las siguientes prácticas: (1) todos los indicadores, índices, métricas, juicio de expertos y evidencias fueron transformadas a una escala común en números reales con un significado semántico de menor a mayor impacto ambiental (2) esta transformación permitió la evaluación, contraste, integración y síntesis de distintos elementos del sistema socioambiental a pesar de que sus unidades originales fueran fundamentalmente distintas, (3) se incorporó el tratamiento objetivo de lo subjetivo con el uso de expresiones lingüísticas que incorporaron la incertidumbre inherente de las apreciaciones del juicio de experto mediante principios de la psicofísica (con la Ley de Weber-Fechner en el artículo Analytic deliberation approach for collaborative determination of impact significance of projects in dispute y con la escala fundamental de Saaty

en el artículo *What is evidence of environmental damage? Navigating expert judgment uncertainty*) (4) todos los métodos fueron replicables, esto es, con los mismos parámetros iniciales invariablemente se llega a los mismos resultados, (5) el mismo grado de impacto se asignó a estados equivalentes de riesgo de daño o daño significativo.

### **Rigor metodológico**

El rigor metodológico en los dos artículos se logra mediante: (1) el uso de métodos estandarizados con reglas de inferencia estrictas, es decir, el utilizar un conjunto formal específico de reglas lógicas bien definidas y precisas para realizar razonamientos y sacar conclusiones válidas, (2) el análisis de los impactos desde todas las perspectivas, conocimiento, juicios y evidencias de manera agnóstica con el fin de minimizar sesgos cognitivos y juicios idiosincráticos, y (3) la incorporación explícita de la incertidumbre inherente de los sistemas socioambientales. El rigor metodológico implica que no ignora ninguna fuente de información o conocimiento, aunque ésta venga de participantes no científicos. El objetivo es garantizar la coherencia del razonamiento a partir de argumentos basados en evidencias y previniendo la influencia de posiciones filosóficas o ideológicas.

En el artículo *Analytic deliberation approach for collaborative determination of impact significance of projects in dispute*, el rigor metodológico se logra al seguir un procedimiento analítico que garantiza consistencia en la fiabilidad, interpretación y presentación de los resultados: *Analysis then consists of the systematic combination of the interaction intensity and environmental vulnerability indexes for the minimum set of impacts. The results are aggregated into categories of impact significance for every geographic entity. This is achieved through a fuzzy pattern classification algorithm (FPC). ... One advantage of SIGnificance is its capacity for displaying empirically valid spatial representations that result from standardized, repeatable, and publicly verifiable geospatial data and methods. The use of SIGnificance contributes to a better understanding of the distribution of both environmental impacts and prevention, mitigation, and compensation measures at a project site. This understanding is fundamental for settling the unavoidable environmental disputes of socio-environmentally complex projects.*

En el artículo *What is evidence of environmental damage? Navigating expert judgment uncertainty* se aborda de manera sistemática y rigurosa como se anclan las percepciones iniciales de los expertos a través de la axiomática y la inferencia Bayesiana: *Regarding Bayesian*

*inference, Morgan (2014) argues that the cognitive shortcuts most relevant to expert elicitation of subjective probabilities are “availability heuristic” and “anchoring and adjustment heuristic.” The availability heuristic relates to the ease with which instances or occurrences of a phenomenon can be brought to mind, while the anchoring and adjustment heuristic refers to the influence of initial information, or “anchor,” and subsequent revision of beliefs to align closely with that anchor. The availability heuristic is applicable to the preconceived hypotheses regarding the liability of the agent, while anchoring and adjustment heuristics pertain to beliefs regarding the accuracy of detecting the causal agent and the validity of conjectured explanatory mechanisms. These heuristics are related to the epistemic uncertainty that arises due to the qualitative nature of the concepts of confidence and plausibility employed in Bayesian inference. Herein lies an advantage of our approach, as we utilize words and propositions as computational objects to address the limitation inherent in expert’s cognition.*

### **Transparencia y comunicación**

En el artículo *Analytic deliberation approach for collaborative determination of impact significance of projects in dispute*, la transparencia y comunicación se abordan mediante el uso de un soporte de decisiones *SIGNificance* que integra la geovisualización como el objeto fronterizo que permitió mostrar de una manera accesible y sintética los resultados de la evaluación del impacto ambiental en representaciones espaciales correspondientes a las perspectivas de las partes interesadas, sin ocultar los índices que sirvieron de insumo.

En el artículo se aborda: *The approach simplifies the application of analytical deliberation to achieve a better understanding of the different perspectives on the importance of impact significance. This simplification is achieved by incorporating geovisualization as a tool to synthesize, translate and communicate impact significance representations. ...Our results demonstrate that geovisualization can make a difference in achieving an open interaction between scientists, authorities, and stakeholders that hold opposing perspectives in the context of projects in dispute. SIGNificance enabled the stakeholders to interchange their thoughts, opinions, or information and thus enriched the discussion of the factual merits of the perspectives portrayed in the spatial representations. ... Our results show how SIGNificance helps in meeting the requirements of the NRC (1996) for analytic deliberation, which include making the relevant information available, in a readily understandable format, without oversimplifying it.*

En el artículo *What is evidence of environmental damage? Navigating expert judgment uncertainty*, la transparencia y comunicación se logra a través de la axiomática para desglosar los mecanismos causales, así como mediante la formalización de las de probabilidades subjetivas asociadas a los juicios de expertos que, a su vez, determinaron que cual era la mejor explicación a los daños ambientales producidos por la contingencia ambiental.

### **Deliberación**

En el artículo *Analytic deliberation approach for collaborative determination of impact significance of projects in dispute*, la deliberación se aborda mediante el proceso estructurado heurístico y recursivo de discusión de cada una de las representaciones espaciales que corresponden a las distintas perspectivas de las implicaciones de la significancia de impactos en una región en un contexto colaborativo.

En el artículo se aborda: *The deliberation component is achieved by discussing the inevitable conflicts of judgments and values that offer insights and knowledge into the issues of concern. ...The objective of deliberation is to enable stakeholders to collectively determine the impact significance of a project. ...As a heuristic process, deliberation starts with the participants judging the accuracy of the distribution of impact significance for each spatial representation. Thus, deliberation entails a recursive process of elimination in which participants systematically search for the “factually competent” (sensu Dietz, 2013) spatial representation that correctly reflects the common understanding of the distribution of impact significance. Deliberation ends when the new collective knowledge and understanding allow for an agreement on the factually competent spatial representation that should be used for the design of a feasible prevention, mitigation, and compensation strategy.*

En el artículo *What is evidence of environmental damage? Navigating expert judgment uncertainty*, la deliberación se resuelve a través del razonamiento abductivo en la evaluación del juicio de expertos, el cual implica la generación de conjuntos de hipótesis alternativas de acuerdo con los puntos de vista de cada experto.

### **Mediación y consenso**

En el artículo *Analytic deliberation approach for collaborative determination of impact significance of projects in dispute*, la mediación y consenso se abordan mediante la creación de espacios seguros de deliberación. En el artículo se aborda: *Operationally, it entails carrying out*

*workshops that function as safe spaces for collaboration (Clark et al., 2016). Participants may include the interdisciplinary team, the project proponent, environmental authorities, and representatives of civil society. One condition for a safe space of collaboration is that facilitators must be agnostic, that is, they must refrain from committing or imposing an opinion about the meaning of impact significance. At the workshops, facilitators explain the deliberation process, provide relevant information about the project, explain the methods and data used to obtain the indexes resulting from step 1, introduce the purpose and function of SIGNificance, facilitate dialogue, moderate debate, and focus the discussion on the minimum set of impacts. Facilitators moderate the process to ensure an open and inclusive dialogue among participants under what is known as a habermesian “ideal speech situation” (Innes and Booher, 2010). This is, all participants have the same opportunities to express their ideas in an uncoerced setting, regardless of background, affiliation, political, social, or academic standing.*

En el artículo *What is evidence of environmental damage? Navigating expert judgment uncertainty*, la mediación y consenso toma un carácter especial, ya que enmarca en el contexto de un litigio ambiental. En esta circunstancia, lo que se busca es identificar la mejor explicación de la evidencia en relación con el nexo causal entre la evidencia de daño y una contingencia ambiental. Así, a lo largo del proceso de razonamiento abductivo, se van generando acuerdos entre los diferentes expertos sobre las probabilidades subjetivas de la presencia del agente causal (“confianza”) y el mecanismo causal (“plausibilidad”). De esta manera, es posible navegar la incertidumbre inherente al juicio experto para identificar la mejor explicación a las evidencias de daño ambiental.

## **7. Conclusiones**

Un sistema de conocimiento para la gobernanza de la complejidad socioambiental es crucial para que la EIA sirva como instrumento para impulsar las transformaciones sostenibles. El sistema de conocimiento requiere como mínimo de integrar tres componentes: gobernanza institucional, teórico-metodológico y metodológico-tecnológico. Un sistema de conocimiento para la gobernanza de la complejidad socioambiental es un artefacto operativo que facilita la generación de conocimiento útil para la conducción del proceso de la EIA en las transformaciones sostenibles.

El Observatorio de EIA muestra algunas evidencias sobre las deficiencias de acceso a la información y participación en México en proyectos turísticos evaluados federalmente y como entonces, el Acuerdo de Escazú abre la oportunidad de espacios de cooperación con organizaciones no gubernamentales para promover observatorios que fomenten el desarrollo, intercambio e implementación de materiales y programas educativos, formativos y de sensibilización y experiencias sobre códigos voluntarios de conducta, guías, buenas prácticas y estándares. Por su parte, los dos artículos que se incluyen en esta tesis ilustran la aplicación del sistema de conocimiento en casos reales de infraestructura gris, emblemáticos e inmersos en conflicto y disputas ambientales en dos sistemas socioambientales altamente complejos y con fuentes de incertidumbre profunda, epistémica, lingüística, inducida política y ambigüedad. La forma como se confirma la utilidad del sistema de conocimiento es porque:

- Aumenta la credibilidad en un proceso de EIA al reconocer que está inmerso en un contexto sociopolítico y socioambiental complejo y por lo tanto incorpora metodológicamente procedimientos para atender la incertidumbre inherente a los sistemas socioambientales.
- Aumenta la relevancia porque los estudios ambientales responden a las necesidades particulares de conocimiento de los asuntos a resolver.
- Disminuye las barreras actuales de participación mediante la incorporación estructurada de distintas formas de conocimiento y perspectivas plurales de las partes interesadas, a través de representaciones inteligibles, portables y racionales, que incluyeron procesos de traducción, deliberación y mediación.
- Aumenta el empoderamiento en los procesos para que las partes interesadas se aseguren que sus intereses y preocupaciones se atienden a pesar de las limitaciones actuales de gobernanza institucional de manera rigurosa, sistemática y transparente.
- Disminuye conflictos y disputas ambientales vía la producción colaborativa de conocimiento mediante representaciones nuevas y la formación de acuerdos en grandes proyectos de infraestructura gris.
- Redefine la manera de ver un impacto ambiental como una presunción refutable que establece el posible nexo entre las obras y actividades y el riesgo por daño o daño significativo en un sistema socioambiental.
- Ayuda a transitar del modelo racional de planeación tradicional a un esquema de planeación colaborativa.



## 8. Referencias

- Adger, W. N., Brown, K., Fairbrass, J., Jordan, A., Paavola, J., Rosendo, S., & Seyfang, G. (2003). Governance for sustainability: Towards a “thick” analysis of environmental decisionmaking. *Environment and Planning A*, 35(6), 1095–1110. <https://doi.org/10.1068/a35289>
- Aitken, C. G. G., & Stoney, D. A. (1991). *The use of statistics in forensic science*. Ellis Horwood Limited.
- Akamani, K., Holzmueller, E. J., & Groninger, J. W. (2016). Managing wicked environmental problems as complex social-ecological systems: the promise of adaptive governance. En *Springer Geography* (pp. 741–762). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-18787-7\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-319-18787-7_33)
- Alexander, E. R. (2000). Rationality Revisited: Planning Paradigms in a Post-Postmodernist Perspective. *Journal of Planning Education and Research*, 19(3), 242–256. <https://doi.org/10.1177/0739456X0001900303>
- Anglés Hernández, M. (2021). El Derecho a Disfrutar de un Medio Ambiente sin Riesgos, Limpio, Saludable y Sostenible en el Convenio de Aarhus Y Escazú. En G. Aguilar Cavallo (Ed.), *El Acuerdo de Escazú. Perspectiva Latinoamericana Comparada* (pp. 143–162). CECOCH.
- Ansell, C., & Boin, A. (2017). Taming Deep Uncertainty: The Potential of Pragmatist Principles for Understanding and Improving Strategic Crisis Management. *Administration & Society*, 51(7), 1079–1112. <https://doi.org/10.1177/0095399717747655>
- Balint, P. J., Stewart, R. E., Desai, A., & Walters, L. C. (2011). *Wicked Environmental Problems : managing uncertainty and conflict* (ISLANDPRESS, Ed.; 1a ed.). Island Press/Center for Resource Economics. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Beattie, R. B. (1995). Everything You Already Know About Eia ( But Don ’ T Often Admit ). *Urban Studies*, 9255(95), 109–114. [https://doi.org/10.1016/0195-9255\(95\)00001-U](https://doi.org/10.1016/0195-9255(95)00001-U)
- Behfar, K., & Okhuysen, G. A. (2018). Perspective-Discovery Within Validation Logic: Deliberately Surfacing, Complementing, and Substituting Abductive Reasoning in

- Hypothetico-Deductive Inquiry. *Organization Science*, 29(2), 323–340.  
<https://doi.org/10.1287/orsc.2017.1193>
- Bellman, R. E. (1957). *Dynamic programming*. Princeton University Press.
- Beltrán, J. F. (2014). La prueba de la causalidad en la responsabilidad civil. En *Causalidad y atribución de responsabilidad* (pp. 211–229). Marcial Pons.
- Bernstein, S., & van der Ven, H. (2017). Best practices in global governance. *Review of International Studies*, 43, 534–556.
- Biddle, J. B. (2016). Inductive Risk, Epistemic Risk, and Overdiagnosis of Disease. *Perspectives on Science*, 24(2), 192–205. [https://doi.org/10.1162/POSC\\_a\\_00200](https://doi.org/10.1162/POSC_a_00200)
- Blackburn, S. (2005). *Truth: A Guide*. Oxford University Press.
- Bojórquez-Tapia, L. A. (1989). Methodology for prediction of ecological impacts under real conditions in Mexico. *Environmental Management*, 13(5), 545–551.  
<https://doi.org/10.1007/BF01874960>
- Bojórquez-Tapia, L. A., Eakin, H., Reed, P. M., Miquelajauregui, Y., Grave, I., Merino-Benítez, T., & Molina-Pérez, E. (2022). Unveiling uncertainties to enhance sustainability transformations in infrastructure decision-making. En *Current Opinion in Environmental Sustainability* (Vol. 55). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2022.101172>
- Bojórquez-Tapia, L. A., & García, O. (1998). An approach for evaluating EIAS-deficiencies of EIA in Mexico. *Environmental Impact Assessment Review*, 18(3), 217–240.  
[https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(98\)00008-0](https://doi.org/10.1016/S0195-9255(98)00008-0)
- Bojórquez-Tapia, L. A., Ongay-Delhumeau, E., & Ezcurra, E. (1994). Multivariate Approach for Suitability Assessment and Environmental Conflict Resolution. *Journal of Environmental Management*, 41(3), 187–198. <https://doi.org/10.1006/JEMA.1994.1042>
- Bojórquez-Tapia, L. A., Pedroza, D., Ponce-Díaz, G., Díaz de León, A. J., & Lluch-Belda, D. (2017). A continual engagement framework to tackle wicked problems: curtailing loggerhead sea turtle fishing bycatch in Gulf of Ulloa, Mexico. *Sustainability Science*, 12(4), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s11625-016-0405-1>

- Bromley, D. (2008). Volitional pragmatism. *Ecological Economics*, 68(1–2), 1–13.  
<https://econpapers.repec.org/RePEc:eee:ecolec:v:68:y:2008:i:1-2:p:1-13>
- Bunge, M. (2000). Systemism: the alternative to individualism and holism. *The Journal of Socio-Economics*, 29(2), 147–157. [https://doi.org/10.1016/S1053-5357\(00\)00058-5](https://doi.org/10.1016/S1053-5357(00)00058-5)
- Bunge, M. (2001). *Diccionario de Filosofía*. Siglo XXI.
- Bunge, M. (2004). How does it work? The search for explanatory mechanisms. *Philosophy of the Social Sciences*, 34(2), 182–210. <https://doi.org/10.1177/0048393103262550>
- Bunge, M. (2017). Why Axiomatize? *Foundations of Science*, 22(4), 695–707.  
<https://doi.org/10.1007/s10699-016-9493-8>
- Burtis, M. M., Gelbach, J. B., & Kobayashi, B. H. (2017). Error Costs, Legal Standards of Proof, and Statistical Significance. *Supreme Court Economic Review*, 25(1), 1–57.  
<https://doi.org/10.1086/694607>
- Burton, G. A., Chapman, P. M., & Smith, E. P. (2002). Weight-of-Evidence Approaches for Assessing Ecosystem Impairment. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 8(7), 1657–1673. <https://doi.org/10.1080/20028091057547>
- Caldwell, L. K. (1988). Environmental impact analysis (EIA): Origins, evolution, and future directions. *Impact Assessment*, 6(3–4), 75–83.  
<https://doi.org/10.1080/07349165.1988.9725648>
- Carey, J. M., & Burgman, M. A. (2008). Linguistic uncertainty in qualitative risk analysis and how to minimize it. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1128, 13–17.  
<https://doi.org/10.1196/annals.1399.003>
- Cash, D. W., Clark, W. C., Alcock, F., Dickson, N., Eckley, N., & Jager, J. (2002). Salience, Credibility, Legitimacy and Boundaries: Linking Research, Assessment and Decision Making. En *RWP02-046* (RWP02-046). <https://doi.org/10.2139/ssrn.372280>
- Cash, D. W., Clark, William. C., Alcock, F., Dickson, N. M., Eckley, N., Guston, D. H., Jager, J., & Mitchell, R. B. (2003). Knowledge systems for sustainable development. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(14), 8086–8091.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.1231332100>

- CEMDA. (2022). *El Acuerdo de Escazú frente a la legislación en México. Un diagnóstico para la ciudadanía y su implementación.*
- Cockburn, J. (2022). Knowledge integration in transdisciplinary sustainability science: Tools from applied critical realism. *Sustainable Development, 30*(2), 358–374.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/sd.2279>
- Cornwall, A. (2008). Unpacking “Participation” Models, meanings and practices. *Community Development Journal, 43*(3), 269–283. <https://doi.org/10.1093/cdj/bsn010>
- CPEUM. (1917). Constitución Política Estados Unidos Mexicanos (Última reforma publicada DOF 18-11-2022). En *Diario Oficial de la federación* (Número DOF 15-09-2017).  
[http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/1\\_150917.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/1_150917.pdf)
- Cranor, C. F. (2004). Some legal implications of the Precautionary Principle: improving information-generation and legal protections. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health, 17*(1), 17–34.
- Craver, C., & Tabery, J. (2019). Mechanisms in Science. En E. N. Zalta (Ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Summer 201).  
<https://plato.stanford.edu/archives/sum2019/entries/science-mechanisms/%3E>
- Crawford-Brown, D., & Crawford-Brown, S. (2011). The precautionary principle in environmental regulations for drinking water. *Environmental Science and Policy, 14*(4), 379–387. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2011.02.002>
- Crowfoot, J., & Wondolleck, J. M. (2012). *Environmental Disputes: Community Involvement In Conflict Resolution*. Island Press.
- Dhami, S., & Sunstein, C. R. (2022). *Bounded Rationality*.
- Dietz, T. (2013). Bringing values and deliberation to science communication. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 110*(SUPPL. 3), 14081–14087. <https://doi.org/10.1073/pnas.1212740110>
- Dietz, T., & Stern, P. C. (1998). Science, values, and biodiversity. *Bioscience, June*, 441–444.

- Dietz, T., Stern, P. C., & Rycroft, R. W. (1989). Definitions of conflict and the legitimation of resources: The case of environmental risk. *Sociological Forum*, 4(1), 47–70.  
<https://doi.org/10.1007/BF01112616>
- DOF. (2021). *Decreto Promulgatorio del Acuerdo Regional sobre el Acceso a la Información, la Participación Pública y el Acceso a la Justicia en Asuntos Ambientales en América Latina y el Caribe, hecho en Escazú, Costa Rica, el cuatro de marzo de dos mil dieciocho.*
- Douglas, H. (2000). Inductive Risk and Values in Science. *Philosophy of Science*, 67(4), 559–579. <https://doi.org/DOI: 10.1086/392855>
- Douglas, H. (2008). The Role of Values in Expert Reasoning. *Public Affairs Quarterly*, 22(1), 1–18.
- Duncan, S. L., & Lach, D. H. (2006). Privileged knowledge and social change: Effects on different participants of using geographic information systems technology in natural resource management. *Environmental Management*, 38(2), 267–285.  
<https://doi.org/10.1007/s00267-005-0162-x>
- Eckerd, A. (2017). Citizen Language and Administrative Response: Participation in Environmental Impact Assessment. *Administration and Society*, 49(3), 348–373.  
<https://doi.org/10.1177/0095399714548272>
- Emerson, K., Nabatchi, T., & Balogh, S. (2012). An integrative framework for collaborative governance. *Journal of Public Administration Research and Theory*, 22(1), 1–29.  
<https://doi.org/10.1093/jopart/mur011>
- Enríquez-de-Salamanca, Á. (2018). Stakeholders' manipulation of Environmental Impact Assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 68(October 2017), 10–18.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eiar.2017.10.003>
- Formby, J. (1990). The politics of environmental impact assessment. *Impact Assessment*, 8(1–2), 191–196. <https://doi.org/10.1080/07349165.1990.9726037>
- Foster, C. E. (2011). Science and the Precautionary Principle in International Courts and Tribunals: Expert Evidence, Burden of Proof and Finality. En *Cambridge Studies in International and Comparative Law*. Cambridge University Press. <https://doi.org/DOI: 10.1017/CBO9780511973680>

- Gallopín, G. C., Funtowicz, S., O'Connor, M., & Ravetz, J. (2001). Science for the Twenty-First Century: From Social Contract to the Scientific Core. *International Social Science Journal*, 53(168), 219–229. <https://doi.org/10.1111/1468-2451.00311>
- García, R. (2006). *Sistemas complejos. Conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria*. Editorial Gedisa.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Gómez-Priego, P., & Bojórquez-Tapia, L. A. (2023). Analytic deliberation approach for collaborative determination of impact significance of projects in dispute, a case study in Mexico. *Environmental Impact Assessment Review*, 100.  
<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107091>
- Good, I. J. (1988). The Interface Between Statistics and Philosophy of Science. *Statistical Science*, 3(4), 386–397. <http://www.jstor.org/stable/2245388>
- Good, I. J. (1991). Weight of evidence and the Bayesian likelihood ratio. En C. G. G. Aitken & D. A. Stoney (Eds.), *The Use of Statistics in Forensics Science* (pp. 85–106). Routledge.
- Good, I. J. (2002). Refutation of Another Seeming Refutation of Special Relativity. *Physics Essays*, 15(3), 350–351.
- Gould, R. K., Coleman, K. J., Krymkowski, D. H., Zafira, I., Gibbs-Plessl, T., & Doty, A. (2019). Broader impacts in conservation research. *Conservation Science and Practice*, 1(11), e108.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1111/csp2.108>
- Gullett, W. (1998). Environmental impact assessment and the precautionary principle: Legislating caution in environmental protection. *Australian Journal of Environmental Management*, 5(3), 146–158. <https://doi.org/10.1080/14486563.1998.10648411>
- Gunderson, R. (2018). Global environmental governance should be participatory: Five problems of scale. *International Sociology*, 33(6), 715–737.  
<https://doi.org/10.1177/0268580918792786>
- Harper, T. L., & Stein, S. (2018). *Dialogical planning in a fragmented society: critically liberal, pragmatic, incremental*. Routledge.

- Harper, T. L., & Stein, S. M. (2006). Modernistic (“Rational”) Planning. En *Dialogical Planning in a Fragmented Society* (pp. 20–39). Transaction Publishers.
- Hartley, N., & Wood, C. (2005). Public participation in environmental impact assessment - Implementing the Aarhus Convention. *Environmental Impact Assessment Review*, 25(4), 319–340. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2004.12.002>
- Hempel, C. G. (1965). Science and Human Values. En *Aspects of Scientific Explanation and Other Essays in the Philosophy of Science* (pp. 81–96). The Free Press.
- Howard, R. A. (1966). Information Value Theory. *IEEE Trans. Syst. Sci. Cybern.*, 1, 22–26.
- Hughes, W. R. (1993). Consistent utility and probability assessment using AHP methodology. *Mathematical and Computer Modelling*, 17(4), 171–177. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0895-7177\(93\)90185-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0895-7177(93)90185-2)
- Innes, J. E., & Booher, D. E. (1999). Consensus building and complex adaptive systems: A framework for evaluating collaborative planning. *Journal of the American Planning Association*, 65(4), 412–423. <https://doi.org/10.1080/01944369908976071>
- Innes, J. E., & Booher, D. E. (2010). Planning with Complexity. En *Planning with Complexity: An Introduction to Collaborative Rationality for Public Policy*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203864302>
- Isaeva, N., Bachmann, R., Bristow, A., & Saunders, M. N. K. (2015). Why the Epistemologies of Trust Researchers Matter. *Journal of Trust Research*. <https://doi.org/10.1080/21515581.2015.1074585>
- Jasanoff, S. (2004). *States of Knowledge: the co-production of science and social order* (p. 317). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203413845>
- Jasanoff, S. (2005). Judgment under siege: the three-body problem of expert legitimacy. En S. Maasen & P. Weingart (Eds.), *Democratization of expertise? Exploring Novel Forms of Scientific Advice in Political Decision-Making* (Vol. 24, pp. 209–224). Springer.
- Jay, S., Jones, C., Slinn, P., & Wood, C. (2007). Environmental impact assessment: Retrospect and prospect. *Environmental Impact Assessment Review*, 27(4), 287–300. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2006.12.001>

- Jensen, R. E. (1981). Scenario probability scaling: an eigenvector analysis of elicited scenario odds ratios. *Futures*, *13*, 489–498.
- Jerneck, A., & Olsson, L. (2020). Theoretical and Methodological Pluralism in Sustainability Science. En T. Mino & S. Kudo (Eds.), *Framing in Sustainability Science: Theoretical and Practical Approaches* (pp. 17–33). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-9061-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-13-9061-6_2)
- Kates, R. W., Clark, W. C., Corell, R., Hall, J. M., Jaeger, C. C., Lowe, I., Mccarthy, J. J., Schellnhuber, H. J., Bolin, B., Dickson, N. M., Faucheux, S., Gallopin, G. C., Grübler, A., Huntley, B., Jäger, J., Narpat, S., Kaspersen, R. E., Mabogunje, A., Matson, P., ... Iii, B. M. (2001). Sustainability Science. *Science*, *292*, 641–642. <https://doi.org/10.1126/science.1059386>
- Kemp, R., Parto, S., & Gibson, R. B. (2005). Governance for sustainable development: moving from theory to practice. *International Journal of Sustainable Development*, *8*, 12–30.
- Kempster, S., & Parry, K. (2011). Grounded Theory and Leadership Research: A Critical Realist Perspective. *The Leadership Quarterly*. <https://doi.org/10.1016/j.leaqua.2010.12.010>
- Knight, F. (2013). Risk, uncertainty and profit. *Vernon Press Titles in Economics*.
- Konefal, J. (2015). Governing Sustainability Transitions: Multi-Stakeholder Initiatives and Regime Change in United States Agriculture. *Sustainability*, *7*(1), 612–633. <https://doi.org/10.3390/su7010612>
- Kontic, B. (2000). Why are some experts more credible than others? *Environmental Impact Assessment Review*, *20*(4), 427–434. [https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(00\)00057-3](https://doi.org/10.1016/S0195-9255(00)00057-3)
- Kwakkel, J. H., Walker, W. E., & Marchau, V. A. W. J. (2010). Classifying and communicating uncertainties in model-based policy analysis. *International Journal of Technology, Policy and Management*, *10*(4), 299–315. <https://doi.org/10.1504/IJTPM.2010.036918>
- Lawrence, D. P. (2000). Planning theories and environmental impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, *20*(6), 607–625. [https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(00\)00036-6](https://doi.org/10.1016/S0195-9255(00)00036-6)
- Lawrence, D. P. (2003a). Conventional EIA Processes. En *Environmental Impact Assessment: Practical Solutions to Recurrent Problems* (pp. 23–88). John Wiley & Sons.



- Lawrence, D. P. (2003b). *Environmental Impact Assessment. Practical Solutions to Recurrent Problems*. John Wiley & Sons, Inc.
- Lemons, J., Shrader-Frechette, K., Cranor, C., Shrader, K., & Carnor, C. (1997). The Precautionary Principle: Scientific Uncertainty and Type I and Type II Errors. *Foundations of Science*, 2(2), 207–236. <https://doi.org/10.1023/A:1009611419680>
- Lewis, D. (1973). *Counterfactuals*. Harvard University Press. <https://doi.org/10.2307/2273738>
- Lewis, D. (2000). Causation as Influence. *The Journal of Philosophy*, 97(4), 182–197. <https://doi.org/10.2307/2678389>
- LGEEPA. (1988). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. (DOF 28-01-1988, última reforma DOF 11-04-2022)*.
- Lin, A. (2004). Beyond tort: compensating victims of environmental toxic injury. *Southern California Law Review*, 78(6), 1439–1528.
- Linkov, I., Loney, D., Cormier, S., Satterstrom, F. K., & Bridges, T. (2009). Weight-of-evidence evaluation in environmental assessment: Review of qualitative and quantitative approaches. *Science of The Total Environment*, 407(19), 5199–5205. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.05.004>
- Lipton, P. (2017). Inference to the Best Explanation. En W. H. Newton-Smith (Ed.), *A Companion to the Philosophy of Science* (pp. 184–193). Blackwell Publishers Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781405164481>
- Liu, J., Dietz, T., Carpenter, S. R., Alberti, M., Folke, C., Moran, E., Pell, A. N., Deadman, P., Kratz, T., Lubchenco, J., Ostrom, E., Ouyang, Z., Provencher, W., Redman, C. L., Schneider, S. H., & Taylor, W. W. (2007). Complexity of Coupled Human and Natural Systems. *Science*, 317(5844), 1513–1516. <https://www.science.org>
- Loorbach, D. A. (2010). Transition management for sustainable development: A prescriptive, complexity-based governance framework. *Governance*, 23, 161–183.
- Lowell, R. B., Culp, J. M., & Dubé, M. G. (2000). A weight-of-evidence approach for Northern river risk assessment: Integrating the effects of multiple stressors. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 19(4), 1182–1190. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/etc.5620190452>

- MacAskill, W. (2014). *Normative Uncertainty*. University of Oxford.
- MacGillivray, B. H., & Franklin, A. (2015). Place as a Boundary Device for the Sustainability Sciences: Concepts of Place, Their Value in Characterising Sustainability Problems, and Their Role in Fostering Integrative Research and Action. *Environmental Science & Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.06.021>
- McGoey, L. (2007). On the will to ignorance in bureaucracy. *Economy and Society*, 36(2), 212–235. <https://doi.org/10.1080/03085140701254282>
- McGoey, L. (2012). Strategic unknowns: towards a sociology of ignorance. *Economy and Society*, 41(1), 1–16. <https://doi.org/10.1080/03085147.2011.637330>
- Meadowcroft, J. (2007). Who is in Charge here? Governance for Sustainable Development in a Complex World\*. *Journal of Environmental Policy & Planning*, 9(3–4), 299–314. <https://doi.org/10.1080/15239080701631544>
- Menzies, P. (2017). Counterfactual Theories of Causation. En Edward. N. Zalta (Ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 201). <https://plato.stanford.edu/archives/win2017/entries/causation-counterfactual/>
- Mitchell, S. D. (1995). *Introduction* (pp. 1–14). The University of Chicago. <https://books.google.ca/books?id=ncEwGwAACAAJ&dq=un+simple+soldat&hl=fr&sa=X&ved=0ahUKEwj-7OHqNbOAhUHGR4KHV07D0cQ6AEIHTAA%5Cnhttps://books.google.com/books?id=O6FcAAAAMAAJ&pgis=1>
- Mitchell, S. D. (2009). Unsimple truths. En *Unsimple Truths*. The University of Chicago. <https://books.google.ca/books?id=ncEwGwAACAAJ&dq=un+simple+soldat&hl=fr&sa=X&ved=0ahUKEwj-7OHqNbOAhUHGR4KHV07D0cQ6AEIHTAA%5Cnhttps://books.google.com/books?id=O6FcAAAAMAAJ&pgis=1>
- Mock, T. J. (1971). Concepts of Information Value and Accounting. *The Accounting Review*, 46(4), 765–778. <http://www.jstor.org/stable/244255>

- Moore, M. (2019). Causation in the Law. En E. N. Zalta (Ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 201). Metaphysics Research Lab, Stanford University.  
<https://plato.stanford.edu/archives/win2019/entries/causation-law/>
- Morgan, M. G. (2014). Use (and abuse) of expert elicitation in support of decision making for public policy. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *111*(20), 7176–7184. <https://doi.org/10.1073/pnas.1319946111>
- Morgan, R. K. (2012). Environmental impact assessment : the state of the art. *Impact Assessment and Project Appraisal ISSN:*, *30*(1), 5–14. <https://doi.org/10.1080/14615517.2012.661557>
- Naciones Unidas. (1948). *Declaración Universal de Derechos Humanos*.
- Naciones Unidas. (1966a). *Pacto Internacional de Derechos Civiles y Políticos*.
- Naciones Unidas. (1966b). *Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales*.
- Naciones Unidas. (1969). *Convención de Viena sobre el derecho de los tratados*.
- Naciones Unidas. (1998). *Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*.
- National Research Council. (1996). Understanding Risk: Informing Decisions in a Democratic Society. En P. C. Stern & H. V. Fineberg (Eds.), *Understanding Risk*. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/5138>
- Nickerson, R. S. (1998). Confirmation Bias: A Ubiquitous Phenomenon in Many Guises. *Review of General Psychology*, *2*(2), 175–220. <https://doi.org/10.1037/1089-2680.2.2.175>
- Orgill, M., York, S., & MacKellar, J. (2019). Introduction to Systems Thinking for the Chemistry Education Community. *Journal of Chemical Education*, *96*(12), 2720–2729.  
<https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00169>
- Ortolano, L., & Shepherd, A. (1995). Environmental impact assessment: Challenges and opportunities. *Impact Assessment*, *13*(1), 3–30.  
<https://doi.org/10.1080/07349165.1995.9726076>
- Ostrom, E. (2009). A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, *325*(5939), 419–422.

- Petts, J. (1999). Handbook of Environmental Impact Assessment. En *Volume 2* (Vol. 2). Blackwell Science.
- Petts, J. (2003). Barriers to Deliberative Participation in EIA: Learning from Waste Policies, Plans and Projects. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management*, 05(03), 269–293. <https://doi.org/10.1142/S1464333203001358>
- PNUMA. (2015). PONER EN PRACTICA EL PRINCIPIO 10 DE RIO Guía de implementación de las Directrices de Bali del PNUMA. *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente*.
- Regan, H. M., Colyvan, M., & Burgman, M. A. (2008). A Taxonomy and Treatment of Uncertainty for Ecology and Conservation Biology. *Ecological applications*, 12(2), 618–628. <https://doi.org/10.2307/3060967>
- RLGEEPA. (2000). *Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Evaluación del Impacto Ambiental. (DOF 30-05-2000, Última reforma publicada 31-10-2014)*.  
[http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg\\_LGEEPA\\_MEIA\\_311014.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LGEEPA_MEIA_311014.pdf)
- Rydin, Y. (2007). Re-Examining the Role of Knowledge Within Planning Theory. *Planning Theory*, 6(1), 52–68. <https://doi.org/10.1177/1473095207075161>
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytical Hierarchy Process*. McGraw-Hill.
- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (1998). Diagnosis with Dependent Symptoms: Bayes Theorem and the Analytic Hierarchy Process. *Operations Research*, 46(4), 491–502.  
<https://doi.org/10.1287/opre.46.4.491>
- Salter, B., & Faulkner, A. (2011). State strategies of governance in biomedical innovation: aligning conceptual approaches for understanding “Rising Powers” in the global context. *Globalization and Health*, 7(1), 3. <https://doi.org/10.1186/1744-8603-7-3>
- Samarapungavan, A., Westby, E. L., & Bodner, G. M. (2006). Contextual epistemic development in science: A comparison of chemistry students and research chemists. *Science Education*, 90(3), 468–495. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/sce.20111>

- Seiffert, M. E. B., & Loch, C. (2005). Systemic thinking in environmental management: Support for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, *13*(12), 1197–1202. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.07.004>
- Sheng, H. X., Ricci, P. F., & Fang, Q. (2015). Legally binding precautionary and prevention principles: Aspects of epistemic uncertain causation. *Environmental Science and Policy*, *54*, 185–198. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.06.016>
- Sheridan, T. B. (1995). Reflections on information and information value. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, *25*(1), 194–196. <https://doi.org/10.1109/21.362952>
- Shrader-Frechette, K. S., & McCoy, E. D. (1994). Biodiversity, biological uncertainty, and setting conservation priorities. *Biology & Philosophy*, *9*(2), 167–195. <https://doi.org/10.1007/BF00857931>
- Simon, H. A. (1956). Rational Choice and the Structure of the Environment. *Psychological Review*, *63*(2), 129–138.
- Simon, H. A. (1990). Bounded Rationality. En J. Eatwell, M. Milgate, & P. Newman (Eds.), *Utility and Probability* (pp. 15–18). Palgrave Macmillan UK. [https://doi.org/10.1007/978-1-349-20568-4\\_5](https://doi.org/10.1007/978-1-349-20568-4_5)
- Simon, H. A. (1991). Bounded rationality and organizational learning. *Organization Science*, *2*(1), p125-34.
- Simpson, N. P., & Basta, C. (2018). Sufficiently capable for effective participation in environmental impact assessment? *Environmental Impact Assessment Review*, *70*(November 2017), 57–70. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2018.03.004>
- Smith, P. G. R., & Theberge, J. B. (1987). Evaluating Natural Areas Using Multiple Criteria: Theory and Practice. *Environmental Management*, *11*(4), 447–460.
- Sober, E. (2000). QUINE’S TWO DOGMAS. *Aristotelian Society Supplementary Volume*, *74*(1), 237–280. <https://doi.org/10.1111/1467-8349.00071>
- Sosa, E. (2007). *A Virtue Epistemology: Apt Belief and Reflective Knowledge* (Vol. 1). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199297023.001.0001>

- Spangenberg, J. H. (2011). Sustainability science: A review, an analysis and some empirical lessons. *Environmental Conservation*, 38(3), 275–287.  
<https://doi.org/10.1017/S0376892911000270>
- Stanford, K. (2017). Underdetermination of Scientific Theory. En E. N. Zalta (Ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 201).  
<https://plato.stanford.edu/archives/win2017/entries/scientific-underdetermination/>
- Stein, S. M., & Harper, T. L. (2003). Power, trust, and planning. *Journal of Planning Education and Research*, 23(2), 125–139. <https://doi.org/10.1177/0739456X03258636>
- Suldovsky, B., McGreavy, B., & Lindenfeld, L. (2018). Evaluating Epistemic Commitments and Science Communication Practice in Transdisciplinary Research. *Science Communication*, 40(4), 499–523. <https://doi.org/10.1177/1075547018786566>
- Suter, G. W., & Cormier, S. M. (2011). Why and how to combine evidence in environmental assessments: Weighing evidence and building cases. *Science of The Total Environment*, 409(8), 1406–1417. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.12.029>
- Sutherland, W. J., Bellingan, L., Bellingham, J. R., Blackstock, J. J., Bloomfield, R. M., Bravo, M., Cadman, V. M., Cleevely, D. D., Clements, A., Cohen, A. S., Cope, D. R., Daemmrich, A. A., Devecchi, C., Anadon, L. D., Denegri, S., Doubleday, R., Dusic, N. R., Evans, R. J., Feng, W. Y., ... Zimmern, R. L. (2012). A collaboratively-derived science-policy research agenda. *PLoS ONE*, 7(3), 3–7. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0031824>
- Tavana, M., Kennedy, D. T., & Mohebbi, B. (1997). An Applied Study Using the Analytic Hierarchy Process to Translate Common Verbal Phrases to Numerical Probabilities. *Journal of Behavioral Decision Making*, 10(2), 133–150. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0771\(199706\)10:2<133::AID-BDM255>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0771(199706)10:2<133::AID-BDM255>3.0.CO;2-5)
- Turner, B. L., Kasperson, R. E., Matson, P. A., McCarthy, J. J., Corell, R. W., Christensen, L., Eckley, N., Kasperson, J. X., Luers, A., Martello, M. L., & others. (2003). A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the national academy of sciences*, 100(14), 8074–8079.
- UNECE. (1998). *CONVENTION ON ACCESS TO INFORMATION, PUBLIC PARTICIPATION IN DECISION-MAKING AND ACCESS TO JUSTICE IN ENVIRONMENTAL MATTERS.*

- UNEP. (1987). *Goals and Principles of Environmental Impact Assessment*.
- UNEP. (1999). *Studies of EIA Practice in Developing Countries* (M. McCabe & B. Sadler, Eds.).  
Division of Technology, Industry and Economics Economics and Trade Branch.
- UNEP. (2002). *Environmental Impact Assessment Training Resource Manual*.
- UNEP. (2016). *Guidelines for Conducting Integrated Environmental Assessments*.  
[https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/16775/IEA\\_Guidelines\\_Living\\_Document\\_v2.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/16775/IEA_Guidelines_Living_Document_v2.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- UNEP. (2018). *Assessing Environmental Impacts - A Global Review of Legislation*.  
[https://www.unep-wcmc.org/system/dataset\\_file\\_fields/files/000/000/494/original/Environmental\\_Impacts\\_Legislation.pdf?1518007077](https://www.unep-wcmc.org/system/dataset_file_fields/files/000/000/494/original/Environmental_Impacts_Legislation.pdf?1518007077)
- United Nations. (1992). *Rio Declaration on Environment and Development* (Número August).  
[papers3://publication/uuid/187C36A1-6342-4FD4-80C3-E7620A6AC29A](https://publications.un.org/doi/pdf/10.187C36A1-6342-4FD4-80C3-E7620A6AC29A)
- United Nations. (2012). The Future We Want. En *Rio+20 United Nations Conference on Sustainable Development* (Número June). <https://doi.org/10.1126/science.202.4366.409>
- United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable. A/RES/70/1* (Número 1). <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- United Nations. (2018). *The Sustainable Development Goals Report 2018*.
- van Kerkhoff, L., & Lebel, L. (2006). Linking Knowledge and Action for Sustainable Development. *Annual Review of Environment and Resources*, 31(1), 445–477.  
<https://doi.org/10.1146/annurev.energy.31.102405.170850>
- Voss, J., Bauknecht, D., & Kemp, R. (2006). *Reflexive governance for sustainable development*.
- Walker, W. E., Harremoës, P., Rotmans, J., van der Sluijs, J. P., van Asselt, M. B. A., Janssen, P., & Kreyer von Krauss, M. P. (2003). Defining Uncertainty: A Conceptual Basis for Uncertainty Management in Model-Based Decision Support. *Integrated Assessment*, 4(1), 5–17. <https://doi.org/10.1076/iaij.4.1.5.16466>

- Wallsten, T. S., Budescu, D. v, Rapoport, A., Zwick, R., & Forsyth, B. (1986). Measuring the Vague Meanings of Probability Terms. En *Journal of Experimental Psychology: General* (Vol. 115, Número 4).
- Weed, D. L. (2005). Weight of Evidence: A Review of Concept and Methods. *Risk Analysis*, 25(6), 1545–1557. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2005.00699.x>
- West, E. (2006). *The Utility of the NESS Test of Factual Causation in Scots Law*. 229(2008), 216–229.
- Weston, J. (2004). EIA in a risk society. *Journal of Environmental Planning and Management*, 47(2), 313–325. <https://doi.org/10.1080/0964056042000209058>
- Wilkins, H. (2003). The need for subjectivity in EIA: discourse as a tool for sustainable development. *Environmental Impact Assessment Review*, 23(4), 401–414. [https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(03\)00044-1](https://doi.org/10.1016/S0195-9255(03)00044-1)
- Wood, G., Rodriguez-Bachiller, A., & Becker, J. (2007). Fuzzy sets and simulated environmental change: Evaluating and communicating impact significance in environmental impact assessment. *Environment and Planning A*, 39(4), 810–829. <https://doi.org/10.1068/a3878>
- Woodward, J. (2016). Causation in Science. En P. Humphreys (Ed.), *The Oxford Handbook of Philosophy of Science*. Oxford University Press. [https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199368815.013.8\\_update\\_001](https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199368815.013.8_update_001)
- Worrall, J. (2009). *Underdetermination, Realism and Empirical Equivalence*. <http://philsci-archive.pitt.edu/4664/>
- Wright, R. W. (2011). The NESS account of natural causation: A response to criticisms. En R. Goldberg (Ed.), *Perspectives on causation* (pp. 13–66). Hart Publishing. <https://doi.org/10.1515/9783110302295.13>
- Yager, R. R. (1979). An eigenvalue method of obtaining subjective probabilities. *Behavioral Science*, 24(6), 382–387. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/bs.3830240604>
- Zadeh, L. A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I. *Information Sciences*, 8(3), 199–249. [https://doi.org/10.1016/0020-0255\(75\)90036-5](https://doi.org/10.1016/0020-0255(75)90036-5)