

Incertidumbre, Complejidad e Interdisciplinariedad en la Investigación Ambiental

Héctor Echavarría-Heras

Cecilia Leal-Ramírez

Jaime Farber Lorda

Humberto Delgadillo Hernández

Correspondencia: hetxavar@cicese.mx

Citar como:

Echavarría Heras, H., Leal Ramírez, C., Farber Lorda J., Delgadillo Hernández H., (2024). *Incertidumbre, Complejidad e Interdisciplinariedad en la Investigación Ambiental. Materiales de apoyo al Curso de Epistemología de la Crisis Ambiental: La Relevancia de la Economía, Ensayo 3.1.* (Comunicaciones del Grupo de Modelación y Análisis Teórico. Serie Divulgación). Departamento de Ecología Marina, CICESE

Resumen

El medio ambiente es un sistema dinámico sujeto a múltiples influencias. Se derivan de ellas efectos que se ligan tanto a procesos naturales como a otros que emanan de las actividades humanas. La investigación ambiental es esencial para entender y mitigar el impacto de estas. Sin embargo, debido a la integración multifactorial a la que hemos hecho referencia, el estudio de los fenómenos ambientales se enfrenta a una manifiesta conjunción de incertidumbre y complejidad. Mas aun, la producción de resultados en ciencia ambiental requiere abordar de manera integral la enmarañada red de interacciones que moldean nuestro entorno. Por necesidad el desarrollo de este tipo de investigación amerita la adopción de enfoques interdisciplinarios. En este trabajo subrayamos primeramente la importancia de reconocer y gestionar la incertidumbre y la complejidad en la investigación ambiental. Así mismo enfatizamos el necesario apego que esta debe exhibir a la multidisciplinariedad. Destacamos también, la importancia de dimensionar estas componentes en forma adecuada y también las formas en que estas están entrelazadas.

1. Introducción

El medio ambiente es un sistema dinámico influenciado por una miríada de factores. Se derivan de ellos efectos que se ligan a procesos naturales y otros que provienen de las actividades humanas. Un preponderante objetivo de la investigación ambiental es generar conocimiento destinado a comprender el impacto de estas últimas en el planeta [1]. Mas aun, la ciencia ambiental enfrenta una serie de retos epistemológicos que son difíciles de abordar. Emergen al intentar descifrar las complejidades de los ecosistemas. O bien, al pretender dimensionar en forma efectiva los impactos de las actividades antropogénicas. Superar dichas dificultades requiere adoptar un enfoque multidisciplinario [2].

Al cobijo de los resultados de la investigación científica se pueden identificar los impulsores fundamentales del cambio ambiental [3]. El conocimiento aportado hace posible, en primera instancia, desarrollar soluciones que mitiguen el impacto de la interacción del hombre con los ecosistemas. También nos ayuda a comprender implicaciones más amplias. Con esto hacemos referencia al impacto del cambio ambiental en la salud humana, la economía y el bienestar social [4-5]. Consecuentemente, las contribuciones de la investigación ambiental son vitales para fundamentar decisiones políticas que respalden el desarrollo sostenible [6].

Debido a la inherente integración multifactorial, podemos reiterar que el estudio de los fenómenos ambientales se enfrenta a una patente conjunción de incertidumbre y complejidad. Por consiguiente, la examinación conducente debe abordar de manera integral la intrincada red de interacciones que explican estos factores. Para esto es de gran ayuda utilizar herramientas geoespaciales [7]. Para ilustrar, citamos a la examinación de imágenes satelitales, teledetección y sistemas de información geográfica (SIG). Estos recursos no solo hacen posible monitorear los cambios en un entorno particular. Permiten adicionalmente rastrear el impacto de la acción antropogénica sobre el medio ambiente en las escalas pertinentes [8].

En adición a los factores de incertidumbre y complejidad que hemos destacado, hay que resaltar uno más. Este se liga al hecho de que la investigación ambiental por necesidad navega a través de un mar de paradigmas multifactoriales. Ciertamente, la producción de resultados en esta disciplina requiere abordar

de manera integral la intrincada red de interacciones que moldean nuestro entorno [9].Y, por necesidad el desarrollo de este tipo de investigación amerita la adopción de enfoques interdisciplinarios. En virtud de esto, como ya hemos expresado, los investigadores ambientales deben desplegar una gran apertura a la utilización de metodos novedosos [10]. Entre estos podemos incluir a la modelación computacional avanzada , Inteligencia artificial y aprendizaje automático, Big Data ambiental, biotecnología y enfoques de ciencia ciudadana. Solo utilizando estos recursos podrán lograr la necesaria integración de grandes cantidades de información. Esta información, es por necesidad proveniente de múltiples escalas y es también de carácter dinámico [11].

En esta contribución intentamos explorar la influencia en la investigación ambiental que emana de la interacción entre la incertidumbre, la complejidad y la interdisciplinariedad. Destacamos la importancia de dimensionar estas componentes en forma adecuada y también las formas en que estas están entrelazadas. Este trabajo también intenta integrar un prontuario de conceptos, definiciones, explicaciones y bibliografía auxiliar para las sesiones de discusión asociadas al desarrollo del módulo 3.1 del curso sobre Epistemología de la Crisis Ambiental: La relevancia de la Economía, impartido en el CICESE. Para la integración del primer borrador trabajo se utilizaron procedimientos de investigación documental y también recursos de inteligencia artificial [12]. La revisión epistemologica de los contenidos resultantes se integró a los deberes a cumplir por los estudiantes para acreditar el curso.

2. Incertidumbre e Investigación Ambiental

La incertidumbre es un aspecto fundamental de la investigación científica. Hace referencia a las limitaciones inherentes a los resultados de esta. Estas limitaciones obedecen parcialmente a la falta de información completa y a la imprevisibilidad de los fenómenos naturales. Por ende, la incertidumbre juega un papel vital en la determinación de nuestra percepción del mundo [13].

La necesidad de abordar los efectos de la crisis ambiental que en la actualidad enfrenta nuestro mundo es imperiosa. Hemos mencionado en la introducción que la investigación ambiental es un campo complejo y desafiante. Expresamos así mismo que esta tiene como cometido el estudio de sistemas naturales y las influencias que sobre estos imbuyen las actividades humanas. Ante esto, la adquisición de conocimiento en materia ambiental se vuelve decisiva. Resulta ser esencial para la instrumentación estrategias de mitigación y en general para toma de decisiones conducentes y efectivas [14]. Sin embargo, no podemos soslayar que la perspectiva científica reconoce que la incertidumbre desempeña un papel significativo en el proceso de adquisición de conocimiento. La incertidumbre implica limitaciones y brechas que merman significativamente nuestra comprensión de sistemas y procesos complejos [15]. En particular forja importantes implicaciones sobre el abordaje de los efectos de la problemática ambiental vigente [16]

Dado este escenario, es procedente resaltar que uno de los mayores retos que la investigación ambiental encara es la omnipresencia de la incertidumbre. Esta necesariamente brota de la imprevisibilidad inherente a los sistemas naturales [17]. Igualmente surge de las limitaciones inherentes a los paradigmas disponibles, por ejemplo, los modelos climáticos. Ciertamente la fiabilidad de estos constructos se ve afectada por la incertidumbre derivada de diversos factores. Entre ellos, podemos mencionar

primeramente a la formación de nubes. Un segundo factor son los cambios en las corrientes oceánicas. Y podemos considerar todavía efectos en la precisión de estos modelos que se asocian a la influencia antropogénica [18].

La validez y confiabilidad de nuestro acervo intelectual son de carácter cuestionable ante la incertidumbre. La mera existencia de este agregado que cuestiona la validez de lo que estamos al tanto fomenta el escepticismo, la exploración intelectual y el cuestionamiento continuo de suposiciones y creencias [19]. La examinación de las implicaciones filosóficas y teóricas de la incertidumbre en la adquisición de conocimiento ha despertado un notorio interés. Son objeto de estudio de la Epistemología. Esta evoca primeramente que los productos de nuestra abstracción tienen una base cuestionable. Qué estos también dependen de la evidencia disponible. Y, por último, que están sujetos a revisión a la luz de nuevos descubrimientos. En lo general el planteamiento central de la epistemología en lo relativo a la incertidumbre cuestiona la idea de certeza absoluta y reconoce las insuficiencias y la falibilidad del conocimiento [20-21]. Podemos establecer entonces que, en una reafirmación del progreso científico, se debe considerar su escrutinio bajo la lupa de la incertidumbre epistemológica [22-24]. La aceptación de los preceptos de esta rama de la filosofía es sin duda importante. Permite a los científicos abordar la adquisición de conocimientos con un sentido de humildad. Les recuerda la importancia del rigor intelectual. Les insta a tener voluntad de participar en el aprendizaje y la mejora continuos. En particular la valoración de los cánones de la incertidumbre epistemológica es fundamental en la apropiación de saberes en materia ambiental. Exige colaboración interdisciplinaria. Demanda de la consideración de puntos de vista diversos. Y también resalta la relevancia de una revisión rigurosa por pares. Esto para reducir los sesgos subjetivos y de este modo fortalecer el conocimiento adquirido [25].

2.2 Incertidumbre y Aleatoriedad

La incertidumbre intrínseca o irreducible, es connatural a un sistema o proceso [26-27]. Surge de la variabilidad inherente o de la omnipresente aleatoriedad. Se le conoce sucintamente como incertidumbre aleatoria [28]. A menudo se asocia con fenómenos naturales inherentemente impredecibles. En estos se pueden incluir eventos cuánticos o bien sistemas caóticos [29]. La incertidumbre aleatoria no puede eliminarse. No obstante, esta puede caracterizarse y gestionarse mediante enfoques probabilísticos.

2.3 Incertidumbre de Medición

En investigación científica, el término incertidumbre de medición se refiere a los posibles errores o variabilidad asociados con el proceso de obtención de mediciones u observaciones [30]. Surge de varios factores. Primeramente, de la precisión del instrumento. De los errores de calibración. También contribuyen a su génesis, el sesgo de muestreo y juicio humano. La incertidumbre de medición puede cuantificarse utilizando métodos estadísticos. Su consideración es esencial para garantizar la confiabilidad y precisión de la base empírica de la investigación.

2.4 Recolección y Análisis de Datos

Hemos expresado que la incertidumbre puede quebrantar la fiabilidad de los resultados de investigación. La falta de sistematización en la recolección, así como también, la ausencia de análisis estadístico de los datos puede explicar en forma parcial la mencionada incertidumbre [31]. Ineludiblemente, los investigadores deben considerar las limitaciones de sus mediciones. Deben también revisar la idoneidad de sus técnicas de muestreo. Y sobre todo deben tener en cuenta las posibles fuentes de sesgo. Para estimar la confiabilidad y validez de los datos se emplean métodos de cuantificación de incertidumbre, como intervalos de confianza. Igualmente, se relaciona con esto el análisis de sensibilidad.

Un factor que contribuye notoriamente a la incertidumbre en la investigación ambiental se relaciona con el tamaño y la pertinencia de la base de datos disponibles [32-33]. Normalmente, el acopio de datos de sistemas naturales puede ser difícil. Por otra parte, cuando hay datos disponibles, estos pueden ser incompletos o poco confiables. En consecuencia, se pueden generar lagunas de conocimiento. Como resultado de esto, el desarrollo de modelos precisos puede ser inalcanzable. Este inconveniente puede imposibilitar que la investigación científica participe en la toma de decisiones informadas.

2.4.1 Intervalos de Confianza

Los intervalos de confianza proporcionan el posible rango de variación en los valores que pueden ocurrir al medir una variable o estimar un parámetro [34]. Ofrecen una medida de la precisión y confiabilidad de dicha medición o estimación. Para dar esta medida, establecen los valores mínimos y máximos que se espera puedan adquirir sus valores reales. Para ello, considerando un determinado nivel de confianza. Por lo general este suele ser por ejemplo del 95%. La comunicación de intervalos de confianza es fundamental. Proporcionan una forma concisa de informar sobre el nivel de incertidumbre de los resultados de una investigación científica en su conjunto.

2.4.2 Análisis de Sensibilidad

Las variaciones en los parámetros de entrada o la modificación de los supuestos establecidos influyen las proyecciones de un modelo. Las mencionadas alteraciones pueden asimismo influenciar las salidas de un sistema. El análisis de sensibilidad es un recurso que permite examinar el grado en el cual se manifiestan los aludidos efectos [35]. La examinación de la sensibilidad de las predicciones también coadyuva con la identificación de los factores que contribuyen en mayor medida a la incertidumbre. Sus resultados ofrecen igualmente una guía para la priorización de la recolección de datos. O bien orientación para realizar mejoras en el modelo. En resumen, el análisis de sensibilidad permite a los científicos comprender las fuentes de incertidumbre. Esto les hace posible orientar sus esfuerzos hacia la reducción de las contribuciones de las más influyentes a la determinación de esta.

2.5 Incertidumbre y Modelación

Los modelos son representaciones aproximadas de sistemas complejos del mundo real. Como a lo más solo constituyen simplificaciones, sus proyecciones generan incertidumbre [36]. Las consecuentes desviaciones entre lo predicho y lo observado emanan principalmente de los supuestos, así como de la

estimación de parámetros, y también emergen de las limitaciones en la estructura del modelo. La incertidumbre debida al modelo puede abordarse mediante análisis de sensibilidad, así como mediante la comparación de modelos y la validación con datos empíricos [37].

2.6 Propagación de Incertidumbre

La propagación de incertidumbre es un factor esencial en la aproximación epistemológica de la indagación científica. La afirmación de su irrupción es fundamental para la evaluación de la fiabilidad de los resultados de esta. Considerar su presencia implica reconocer las incertidumbres en los parámetros de entrada. Y también aquellas ligadas a los datos. Es también asentar que estas trascienden a través de modelos o cálculos para así generar incertidumbre en las predicciones [38]. La realización de este ejercicio de admitir la susodicha propagación, permite a los científicos comprender la incertidumbre general en sus predicciones o estimaciones. Es especialmente relevante al lidiar con sistemas complejos con variables interconectadas.

2.7 Influencia en los Resultados de Investigación

El manejo de la incertidumbre impulsa la integridad de la investigación científica. Acotar la incertidumbre permite resaltar las brechas en el conocimiento. Anima a los investigadores a indagar más exhaustivamente [39]. Los científicos reconocen que abordar la incertidumbre requiere primeramente llevar a cabo una cuidadosa recolección de datos. Demanda igualmente diseñar adecuadamente la experimentación. Y contribuye además a lo relacionado con lograr una adecuada formulación de hipótesis [40]. Valga agregar que el proceso de desarrollo de estas implica poner a prueba explicaciones alternativas, lo cual por ende apoya al refinamiento del conocimiento avanzado.

2.8 Influencia de la Incertidumbre en la Toma de Decisiones

La manifestación de incertidumbre en la investigación ambiental, afecta singularmente a la toma de decisiones informadas. Ante la presencia de incertidumbre, esta debe ocurrir al cobijo de una perspectiva cautelosa y adaptable [41]. Para lograr esto resulta esencial que actores imprescindibles compartan su conocimiento y experiencia. En primer lugar, destaca la participación de los científicos. En segundo lugar, es forzoso contar con la colaboración de los responsables de formular políticas ambientales. Resulta necesario además tomar en cuenta los posicionamientos de las partes interesadas [42]. La conjunción de conocimientos, experiencias, habilidades e intereses de estos participantes es fundamental. Hace posible desarrollar una comprensión más completa de los sistemas ambientales y los factores que los influyen. Puede también aportar información valiosa en lo referente a su conservación. Consigue también identificar áreas de incertidumbre, como a desarrollar estrategias para gestionar y mitigar los riesgos asociados con estas [43]. Por otra parte, ante la incertidumbre es conveniente destacar la relevancia del análisis de riesgos. Este permite a los responsables de instrumentar políticas comprender las incertidumbres asociadas con diferentes escenarios. Hace posible evaluar los conflictos potenciales y seleccionar estrategias apropiadas. Fundamenta la adopción de un enfoque transparente e inclusivo para

la toma de decisiones, considerando escenarios inciertos, fomenta además la gestión adaptativa y la resiliencia [44].

2.9 Incertidumbre y Comunicación de Resultados de Investigación

Abordar de manera efectiva la crisis ambiental requiere una comunicación clara y transparente. En esta perspectiva, es sumamente importante hacer partícipe de la mencionada comunicación a las incertidumbres científicas que inciden [45]. Los investigadores ambientales deben explicar claramente las limitaciones y los niveles de confianza de sus resultados. Al hacerlo deben evitar el recurrir a la simplificación excesiva o bien a la exageración. La transparencia genera confianza pública, facilita la toma de decisiones informadas y evita el rechazo de la evidencia científica con base en la incertidumbre [46].

Las definiciones y conceptos que hemos vertido en esta Sección 2 ilustran la naturaleza multifacética de la incertidumbre en la investigación científica. Concluimos estableciendo que, al reconocer y cuantificar la incertidumbre, los científicos pueden refinar su comprensión de los fenómenos o sistemas abordados. Consiguen asimismo mejorar las predicciones derivadas de sus contribuciones. Por último, logran orientar la tomar decisiones informadas. Esto reviste singular relevancia, especialmente en el contexto de la problemática ambiental contemporánea. Un análisis de veracidad, coherencia y pertinencia de lo expresado en esta sección se realizó mediante el uso de herramientas de inteligencia artificial [47].

3. Complejidad e Investigación Ambiental

Ser complejo connota que algo está compuesto de muchas partes diferentes interrelacionadas que dificultan su comprensión o análisis [48]. Un sistema complejo puede tener muchos componentes diferentes que interactúan entre sí de manera impredecible. Puede además albergar muchos circuitos de retroalimentación [49]. En la actualidad, nuestro mundo se encuentra en constante evolución. El referido dinamismo hace de la complejidad un elemento que impregna diversos aspectos de nuestra vida cotidiana [50]. Consabidamente, la noción de complejidad moldea nuestra comprensión del mundo y plantea retos que requieren enfoques novedosos para una navegación efectiva. Tipifica desde sistemas tecnológicos intrincados hasta redes socioeconómicas globales. La teoría de la complejidad proporciona el marco que hace posible la exploración destinada a comprender el comportamiento de estos sistemas. La base formal de dicha teoría, son las matemáticas. Empero, esta se fundamenta también en la informática y otras disciplinas.

Dos conceptos coaligados al de complejidad son el de emergencia y el de autoorganización [48]. Emergencia hace referencia al surgimiento de nuevas propiedades o comportamientos de un sistema complejo. Emanan de las interacciones de las unidades individuales que forman dicho sistema. Las propiedades emergentes no pueden atribuirse directamente a ningún elemento individual. Se derivan del comportamiento colectivo del sistema [51]. Además, los sistemas complejos a menudo exhiben tendencias a la autoorganización. Se asocian con patrones y estructuras que se forman y evolucionan de manera espontánea. Es decir, sin control externo [52]. Entender la traza de la emergencia y la

autoorganización es fundamental en la caracterización de los sistemas complejos. Permite entender la forma en la cual funcionan y evolucionan temporalmente dichos sistemas [53].

Los sistemas adaptativos complejos, se caracterizan por su capacidad para adecuarse y aprender de su entorno [54-55]. Entre estos, podemos incluir a las redes sociales, ecosistemas y economías. Exhiben una interacción dinámica entre agentes o entidades, bucles de retroalimentación y flujos de información. En virtud de esto, pueden responder y adaptarse a los cambios en su entorno. La perspectiva de la complejidad permite formalizar el análisis de estos sistemas de este modo entender su comportamiento. Mediante dicha examinación podemos obtener valiosas ideas sobre su resiliencia, robustez y capacidad de innovación.

Cerramos esta sección reiterando que la complejidad es una característica distintiva de los sistemas ambientales. Su estructura incluye intrincadas redes de relaciones y bucles de retroalimentación. La influencia de estos puede llevar al sistema a mostrar resultados no lineales e impredecibles [56]. Los ecosistemas, por ejemplo, exhiben propiedades emergentes que surgen de las interacciones de innumerables especies y los concurrentes factores ambientales [57]. Por ende, desentrañar la dinámica de los sistemas ambientales requiere de una perspectiva holística. Un análisis de veracidad, coherencia y pertinencia de lo expresado en esta sección se realizó mediante el uso de herramientas de inteligencia artificial [58].

4. Interdisciplinariedad en la Investigación Ambiental

La dimensión natural y social de los sistemas ambientales es responsable de las implicaciones atribuibles a la complejidad que mencionamos en la sección 3. Estas implicaciones conllevan retos epistemológicos que la investigación ambiental debe encarar. En principio su consideración hace necesario adoptar una perspectiva interdisciplinaria. La integración de conocimientos y metodologías de diferentes disciplinas permite comprender mejor dichos retos. Y por ende contribuir al desarrollo de soluciones innovadoras [59]. En un típico arreglo multidisciplinar para el estudio lo ambiental pueden concurrir la ecología, la hidrología, la sociología, la economía entre otras [60-61]. Consideremos para ilustra esto, la remediación de la contaminación del agua. Implementar estrategias exitosas demanda la integración de conocimientos provenientes de la química, la biología, la ingeniería y las ciencias sociales. Mas aun esta integración multidisciplinaria permite la evaluación de fuentes de contaminación e impactos de esta. Hace posible por añadidura la creación de planes de mitigación. Conducentemente en el caso general, solamente a través de la colaboración interdisciplinaria se pueden concebir soluciones efectivas. La interdependencia de las cuestiones ambientales justifica este enfoque, mismo que permite el desarrollo de políticas y prácticas más informadas [62]. Un análisis de veracidad, coherencia y pertinencia de lo expresado en esta sección se realizó mediante el uso de herramientas de inteligencia artificial [63].

5. El Nexo entre la Incertidumbre, la Complejidad y la Interdisciplinariedad en la Investigación Ambiental

Podemos considerar a la interdependencia de la incertidumbre, la complejidad y la interdisciplinariedad en la investigación ambiental como una asociación simbiótica [64]. Su principal contribución es el impulso al progreso científico en lo relativo a nuestro entorno lo cual favorece la toma de decisiones informadas.

A medida que aumenta nuestra conciencia de los intrincados sistemas ambientales, más reconoceremos las incertidumbres inherentes a ellos. La integración de disciplinas permite la creación de modelos y tácticas que puedan dar cuenta de esta incertidumbre [65]. Y no solo esto, la mencionada integración hace también posible el capturar las intrincadas relaciones que impulsan la transformación ambiental. Abundando en el tema central de esta sección es procedente enfatizar que la naturaleza multifacética de las cuestiones ambientales hace necesaria la adopción de un enfoque interdisciplinario. Esta perspectiva catapultada el potencial de múltiples disciplinas individuales dándole al todo que estas forman una insigne capacidad para identificar tendencias subyacentes [66]. Como establecen Larkin y colaboradores, un beneficio importante derivado de la adopción de un esquema multidisciplinario para interpretar lo ambiental es que este hace posible desarrollar soluciones innovadoras [67]. Un análisis de veracidad, coherencia y pertinencia de lo expresado en esta sección se realizó mediante el uso de herramientas de inteligencia artificial [68].

6. Conclusión

La perspectiva científica de la incertidumbre hace eco de la persistente influencia de esta en la adquisición de conocimiento. Esto es especialmente concerniente a aquel relacionado con lo ambiental. En esos confines, la incertidumbre moldea la recolección y el análisis de datos, desafía la modelación y predicción y limita la toma de decisiones sustentadas en la información.

La intersección de la investigación ambiental y la interdisciplinariedad resalta la complejidad de los desafíos actuales. Subraya también la imperiosa necesidad de aportar soluciones innovadoras y colaborativas. Para abordar los problemas ambientales, es crucial reconocer las incertidumbres inherentes y utilizar el paradigma de la complejidad como medio para lograr una mayor comprensión. La intersección de disciplinas proporciona una hoja de ruta para navegar en este terreno pletórico de dificultades epistemológicas. Dado este escenario reafirmamos que al adoptar una perspectiva interdisciplinaria no solo ayuda en lo epistemológico, también nos permite obtener una comprensión más profunda de los sistemas ambientales y tomar decisiones informadas para el mejoramiento de nuestro planeta. Examinar la importancia de los efectos de la combinación de incertidumbre, complejidad e interdisciplinariedad en materia ambiental es esencial. Sin duda seguirá impulsando el progreso hacia la identificación de los inciertos laberintos de nuestro entorno. Coadyuvará indubitablemente con el establecimiento de un rumbo sostenible.

Agradecimientos

Se agradece en forma muy especial el apoyo incondicional recibido por parte del CICESE, nuestra generosa institución que este año celebra su quincuagésimo aniversario. Angelica M. Moreno contribuyo con tareas de edición.

Agradecimientos

Gracias a Angelica María Moreno por su participación en las tareas de edición.

Referencias

1. Scholz, I. (2019). The relevance of environmental research for development studies. *Building Development Studies for the New Millennium*, 337-359.
2. Bjurström, A., & Polk, M. (2011). Climate change and interdisciplinarity: a co-citation analysis of IPCC Third Assessment Report. *Scientometrics*, 87(3), 525-550.
3. United Nations Environment Programme (2019). Drivers Of Environmental Change. In *Global Environment Outlook Geo-6 Healthy Planet, Healthy People*. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/27654>
4. Homer-Dixon, T. F. (1991). On the threshold: environmental changes as causes of acute conflict. *International security*, 16(2), 76-116.
5. Black, R., Adger, W. N., Arnell, N. W., Dercon, S., Geddes, A., & Thomas, D. (2011). The effect of environmental change on human migration. *Global Environmental Change*, 21, S3-S11. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.10.001>
6. Wise, R., Fazey, I., Stafford Smith, M., Park, S., Eakin, H., Archer Van Garderen, E., & Campbell, B. (2014). Reconceptualizing adaptation to climate change as part of pathways of change and response. *Global Environmental Change*, 28, 325-336. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.12.002>
7. Pahl-Wostl, C. (2007). The implications of complexity for integrated resources management. *Environmental modelling & software*, 22(5), 561-569.
8. Jhanwar, M. M. (2022). Exploring the Contemporary Environmental Science Methods. *International Journal of Multidisciplinary Innovative Research*. Special Issue (Apr' 2022).181-188
9. Lambin, E. F., & Geist, H. J. (Eds.). (2008). *Land-use and land-cover change: local processes and global impacts*. Springer Science & Business Media.
10. Perez, P., & Batten, D. (2006). *Complex science for a complex world: exploring human ecosystems with agents* (p. 334). ANU Press.
11. Wiens, J. A., & Bachelet, D. (2010). Matching the Multiple Scales of Conservation with the Multiple Scales of Climate Change. *Conservation Biology*, 24(1), 51-62. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2009.01409.x>

12. Open AI (2024) Chat GPT, Large Language Model. <https://openai.com/chatgpt/>
13. Kampourakis, K., & McCain, K. (2019). Uncertainty is inherent in science. In *Uncertainty: How it makes science advance* (online ed.). Oxford Academic. <https://doi.org/10.1093/oso/9780190871666.003.0011>
14. Brundtland, G. H., Ehrlich, P., Goldemberg, J., Hansen, J., Lovins, A., Likens, G., ... & Watson, B. (2012). *Environment and development challenges: the imperative to act*. The Asahi Glass Foundation, Tokyo.
15. Doyle, E. E., Thompson, J., Hill, S., Williams, M., Paton, D., Harrison, S., Bostrom, A., & Becker, J. (2023). Where does scientific uncertainty come from, and from whom? Mapping perspectives of natural hazards science advice. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 96, 103948. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103948>.
16. Kunreuther, H., Gupta, S., Bosetti, V., Cooke, R., Dutt, V., Ha-Duong, M., ... & Weber, E. (2014). Integrated risk and uncertainty assessment of climate change response policies. In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 151-206). Cambridge University Press.
17. Regan, H. M., Colyvan, M., & Burgman, M. A. (2002). A taxonomy and treatment of uncertainty for ecology and conservation biology. *Ecological applications*, 12(2), 618-628.
18. Sexton, D. M., Murphy, J. M., Collins, M., & Webb, M. J. (2012). Multivariate probabilistic projections using imperfect climate models part I: outline of methodology. *Climate dynamics*, 38, 2513-2542.
19. Ziman, J., & Ziman, J. M. (1991). *Reliable knowledge: An exploration of the grounds for belief in science*. Cambridge University Press.
20. Sol, K., & Heng, K. (2022). Understanding epistemology and its key approaches in research. *Cambodian Journal of Educational Research*, 2(2), 80-99.
21. Steup, M., & Neta, R. (2024). Epistemology. In E. N. Zalta & U. Nodelman (Eds.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Spring 2024 Edition). <https://plato.stanford.edu/archives/spr2024/entries/epistemology/>
22. Chen, C., Song, M., Chen, C., & Song, M. (2017). The uncertainty of science: Navigating through the unknown. *Representing scientific knowledge: The role of uncertainty*, 1-35.
23. Srivastava, S., Mehta, L., & Adam, H. N. (2021). Climate change and uncertainty: politics and perspectives. In *The Politics of Climate Change and Uncertainty in India* (pp. 1-26). Routledge.
24. Mehta, L., Adam, H. N., & Srivastava, S. (2022). The politics of climate change and uncertainty in India (p. 214). Taylor & Francis

25. Sjögren, H. (2014). Educable futures?: Managing epistemological uncertainties in sustainability education. *Resilience: A J.*
26. Stewart, T. R. (2000). Uncertainty, judgment, and error in prediction. *Prediction: Science, decision making, and the future of nature*, 41, 42.
27. Marotzke, J. (2019). Quantifying the irreducible uncertainty in near-term climate projections. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 10(1), e563.
28. Porter, K. (2016) Can one divide uncertainty into two kinds? *Risk Basics 1*, SPA Risk LLC, Denver CO, p. 1-5. <https://www.sparisk.com/pubs/Porter-2016-Two-Kinds-of-Uncertainty.pdf>
29. Norman, G. (2011). Chaos, complexity and complicatedness: lessons from rocket science. *Medical education*, 45(6), 549-559.
30. Hall, B. D., & White, D. R. (2020). An Introduction to Measurement Uncertainty (p. 50). Measurement Standards Laboratory of New Zealand. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3872590>
31. Berdondini, A. (2021). The uncertainty of the statistical data. *ScienceOpen Preprints*. Preprint first posted online: 29 November 2021 DOI: 10.14293/S2199-1006.1.SOR-.PPNDDMU.v1
32. Brown, J. D. (2010). Prospects for the open treatment of uncertainty in environmental research. *Progress in Physical Geography*, 34(1), 75-100.
33. Beekhuizen, J., Heuvelink, G. B., Huss, A., Bürgi, A., Kromhout, H., & Vermeulen, R. (2014). Impact of input data uncertainty on environmental exposure assessment models: A case study for electromagnetic field modelling from mobile phone base stations. *Environmental Research*, 135, 148-155. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.05.038>
34. Cumming, G., & Fidler, F. (2009). Confidence intervals: Better answers to better questions. *Zeitschrift für Psychologie/Journal of Psychology*, 217(1), 15-26.
35. Iooss, B., & Saltelli, A. (2017). Introduction to sensitivity analysis. *Handbook of uncertainty quantification*, 1103-1122.
36. Batty, M., & Torrens, P. M. (2001). Modelling complexity: the limits to prediction. *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.1035>
37. Azmy, Y., Sartori, E., & Cacuci, D. G. (2010). Sensitivity and uncertainty analysis of models and data. *Nuclear Computational Science: A Century in Review*, 291-353.
38. Farrance, I., & Frenkel, R. (2012). Uncertainty of Measurement: A Review of the Rules for Calculating Uncertainty Components through Functional Relationships. *The Clinical Biochemist Reviews*, 33(2), 49-75. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3387884/>

39. Funtowicz, S. O., & Ravetz, J. R. (1990). *Uncertainty and quality in science for policy* (Vol. 15). Springer Science & Business Media.
40. Ascough II, J. C., Maier, H. R., Ravalico, J. K., & Strudley, M. W. (2008). Future research challenges for incorporation of uncertainty in environmental and ecological decision-making. *Ecological modelling*, 219(3-4), 383-399.
41. Risbey, J., Kandlikar, M., Dowlatabadi, H., & Graetz, D. (1999). Scale, context, and decision making in agricultural adaptation to climate variability and change. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 4, 137-165.
42. Reed, M., Stringer, L., Fazey, I., Evely, A., & Kruijssen, J. (2014). Five principles for the practice of knowledge exchange in environmental management. *Journal of Environmental Management*, 146, 337-345. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.021>
43. Hariram, N. P., Mekha, K. B., Suganthan, V., & Sudhakar, K. (2023). Sustainalism: An Integrated Socio-Economic-Environmental Model to Address Sustainable Development and Sustainability. *Sustainability*, 15(13), 10682. <https://doi.org/10.3390/su151310682>
44. Balint, P. J. (2011). *Wicked environmental problems: managing uncertainty and conflict*. Island Press.
45. Udovyk, O., & Gilek, M. (2013). Coping with uncertainties in science-based advice informing environmental management of the Baltic Sea. *Environmental Science & Policy*, 29, 12-23
46. Wong, C. W., Wong, C. Y., & Tang, A. K. (2021). Strategies for Building Environmental Transparency and Accountability. *Sustainability*, 13(16), 9116. <https://doi.org/10.3390/su13169116>
47. OpenAI (2024). **Análisis de veracidad, coherencia y pertinencia de la Sección 2 del Ensayo: Incertidumbre, Complejidad e Interdisciplinariedad en la Investigación Ambiental. Conversación directa con ChatGPT.** <https://openai.com/chatgpt/>
48. Heylighen, F. (2008a). Complexity and self-organization. *Encyclopedia of library and information sciences*, 3, 1215-1224.
49. Ladyman, J., Lambert, J., & Wiesner, K. (2013). What is a complex system?. *European Journal for Philosophy of Science*, 3, 33-67.
50. Turner, J. R., & Baker, R. M. (2019). Complexity Theory: An Overview with Potential Applications for Social Sciences. *Systems*, 7(1), 4. <https://doi.org/10.3390/systems7010004>
51. Zheng, Z. (2021). An introduction to emergence dynamics in complex systems. *Frontiers and Progress of Current Soft Matter Research*, 133-196.
52. Kurdyumov, S. P. (1990). Evolution and self-organization laws in complex systems. *Advances in Theoretical Physics*, 134.

53. Heylighen, F. (2008b). Complexity and self-organization. LAPLANTE, Phillip. Encyclopedia of Information Systems and Technology, 1, 250-259.
54. Chan, S. (2001). Complex adaptive systems. In ESD. 83 research seminars in engineering systems (Vol. 31, pp. 1-9). Cambridge, MA, USA: MIT.
55. Carmichael, T., & Hadžikadić, M. (2019). The fundamentals of complex adaptive systems (pp. 1-16). Springer International Publishing.
56. Palliser, A. (2015). Building Adaptive Capacity For Natural Resource Management In Akaroa Coastal Environment, New Zealand (Doctoral dissertation, University of Otago).
57. Riva, F., Graco-Roza, C., Daskalova, G. N., Hudgins, E. J., M. Lewthwaite, J. M., Newman, E. A., Ryo, M., & Mammola, S. (2023). Toward a cohesive understanding of ecological complexity. Science Advances, 9(25). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abq4207>
58. OpenAI (2024). Análisis de veracidad, coherencia y pertinencia de la Sección 3 del Ensayo: Incertidumbre, Complejidad e Interdisciplinariedad en la Investigación Ambiental. Conversación directa con ChatGPT. <https://openai.com/chatgpt/>
59. Lindenfeld, L. A., Hall, D. M., McGreavy, B., Silka, L., & Hart, D. (2012). Creating a place for environmental communication research in sustainability science. Environmental Communication: A Journal of Nature and Culture, 6(1), 23-43.
60. Lowe, P., & Phillipson, J. (2006). Reflexive Interdisciplinary Research: The Making of a Research Programme on the Rural Economy and Land Use. Journal of Agricultural Economics, 57(2), 165-184. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9552.2006.00045.x>
61. Phillipson, J., Lowe, P., & Bullock, J. M. (2009). Navigating the social sciences: Interdisciplinarity and ecology. Journal of Applied Ecology, 46(2), 261-264. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2009.01625.x>
62. Nesshöver, C., Assmuth, T., Irvine, K. N., Rusch, G. M., Waylen, K. A., Delbaere, B., Haase, D., Jones-Walters, L., Keune, H., Kovacs, E., Krauze, K., Külvik, M., Rey, F., van Dijk, J., Vistad, O. I., Wilkinson, M. E., & Wittmer, H. (2017). The science, policy and practice of nature-based solutions: An interdisciplinary perspective. Science of The Total Environment, 579, 1215-1227. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.106>
63. OpenAI (2024). Análisis de veracidad, coherencia y pertinencia de la Sección 4 del Ensayo: Incertidumbre, Complejidad e Interdisciplinariedad en la Investigación Ambiental. Conversación directa con ChatGPT. <https://openai.com/chatgpt/>
64. Kammen, D. M. (2013). Complexity and interdisciplinary approaches to environmental research. Environmental Research Letters, 8(1), 010201

65. Hamel, P., & Bryant, B. P. (2017). Uncertainty assessment in ecosystem services analyses: Seven challenges and practical responses. *Ecosystem Services*, 24, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.12.008>
66. Edwards, G.I. (2019). Multidisciplinary Approach to Environmental Problems and Sustainability. In: Leal Filho, W. (eds) *Encyclopedia of Sustainability in Higher Education*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-63951-2_241-1
67. Larkin, A., Hoolohan, C., & McLachlan, C. (2020). Embracing context and complexity to address environmental challenges in the water-energy-food nexus. *Futures*, 123, 102612. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2020.102612>
68. OpenAI (2024). Análisis de veracidad, coherencia y pertinencia de la Sección 5 del Ensayo: Incertidumbre, Complejidad e Interdisciplinariedad en la Investigación Ambiental. Conversación directa con ChatGPT. <https://openai.com/chatgpt/>