



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Fundamentos teóricos y lineamientos metodológicos para la incorporación del concepto de incertidumbre en la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA)

Néstor Camilo Gómez Ochoa

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Económicas
Instituto de Estudios Ambientales (IDEA)
Bogotá, Colombia

2016

Fundamentos teóricos y lineamientos metodológicos para la incorporación del concepto de incertidumbre en la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA)

Néstor Camilo Gómez Ochoa

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Medio Ambiente y Desarrollo

Director:

Ph.D. José Javier Toro Calderón

Codirector:

Ph.D. Óscar Germán Duarte Velasco

Línea de Investigación:

Evaluación de Impacto Ambiental

Grupo de Investigación:

Instituto de Estudios Ambientales - IDEA

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Económicas

Instituto de Estudios Ambientales (IDEA)

Bogotá, Colombia

2016

Fundamentos teóricos y lineamientos metodológicos para la incorporación del concepto de incertidumbre en la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA)

Theoretical fundaments and methodological guidelines for incorporating the concept of uncertainty in the Environmental Impact Assessment (EIA)

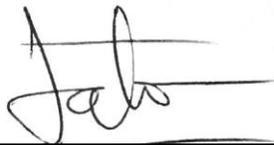


Original firmado por:

Néstor Camilo Gómez Ochoa

Autor

Fecha de nacimiento: 13 de agosto de 1987



Original firmado por:

Ph.D. José Javier Toro Calderón

Director



Original firmado por:

Ph.D. Óscar Germán Duarte Velasco

Codirector

Bogotá, mayo de 2016

Dedicatoria

A mis padres y a mis amigos quienes contribuyeron en este gran proceso de aprendizaje con su compañía y apoyo.

Todos somos ignorantes, sólo que no todos ignoramos lo mismo. [Traducción propia] Will Rogers, New York Times, 1924.

Agradecimientos

A esa inexplicable entidad llamada por algunos Dios, por otros Destino o simplemente Azar, que escapa a nuestro entendimiento absoluto y que confluó para brindarme la oportunidad de esta maravillosa experiencia de formación académica, profesional y personal.

A mis padres por los valores que me inculcaron y por su apoyo a lo largo de todos mis años de vida.

A mis amigos por su compañía, apoyo y paciencia a lo largo de este proceso.

A todos los colombianos que han contribuido para darnos a muchos la oportunidad de desarrollar nuestros procesos de aprendizaje en la institución de educación superior más importante del país.

A los profesores Javier Toro y Óscar Duarte por su dedicación, guía, rigurosidad y por compartir conmigo su conocimiento y experiencia de la forma que sólo verdaderos maestros pueden hacerlo.

A todos los otros profesores del Instituto de Estudios Ambientales (IDEA) quienes me inspiraron a reflexionar acerca de lo que significa el pensamiento y la acción ambiental.

Al Colegio Refous por la magnífica educación que me brindó en mis primeros años de vida académica y que, no obstante, aún hoy aplico a diario.

Resumen

A los seres humanos nos resulta imposible evitar transformar en algún grado los ecosistemas como resultado de nuestras actividades cotidianas; sin embargo, teniendo en cuenta nuestra dependencia de los beneficios que nos brindan, resulta imperativo transformarlos gestionando adecuadamente los potenciales impactos ambientales que nuestras actividades puedan generar sobre. En este sentido, el proceso de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) y los estudios técnicos en los que se basa son herramientas que nos permiten procurar por dicha gestión.

Partiendo de reconocer esta importancia, a lo largo de este trabajo construimos un marco teórico y generamos un conjunto de lineamientos metodológicos que tienen por objetivo facilitar la incorporación de la incertidumbre involucrada en las predicciones que se realizan en el marco de una EIA. Esto mejorará el proceso de modelamiento del comportamiento del ambiente ante posibles alteraciones que resulten de la actividad humana, lo que es fundamental para la EIA, y, por lo tanto, mejorará también el proceso de EIA en general.

Palabras clave: Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), Estudios de Impacto Ambiental (EslA), incertidumbre.

Abstract

It's impossible for human beings not to transform ecosystems to some extent as a result of our daily activities. However, given our dependence on the benefits they provide, it is imperative that the transformation of ecosystems builds on a proper management of the environmental impacts that our activities may produce on. In this regard, the process of Environmental Impact Assessment (EIA) and the technical studies in which it is based are tools that allow us to seek for such management.

From recognizing the abovementioned importance, in this paper we present a related theoretical framework and generate a set of methodological guidelines aiming to facilitate the incorporation of the uncertainty involved in the predictions made in an EIA. This will improve the modeling of the environment behavior towards possible alterations resulting from human action, which is fundamental for EIA, and, therefore, the whole process of EIA itself.

Keywords: Environmental Impact Assessment (EIA), Environmental Impact Study (EIS), uncertainty.

Contenido

	Pág.
Resumen	XI
Lista de figuras	XVI
Lista de abreviaturas	XVII
Introducción	19
1. Fundamentos teóricos y conceptuales	27
1.1 ¿Qué entendemos por incertidumbre?	27
1.2 La EIA como una herramienta de carácter predictivo	30
1.3 El mecanicismo como paradigma científico.....	34
1.4 La complejidad como paradigma científico.....	39
1.4.1 Sistemas complejos.....	48
1.4.2 Comportamientos caóticos.....	55
1.4.3 Descripciones imperfectas	71
1.5 Entonces... ¿cómo abordar la incertidumbre?	80
2. La EIA vista desde la complejidad	89
2.1 El ambiente como un sistema complejo	89
2.2 Fuentes de incertidumbre en la EIA.....	96
2.3 Los principios de prevención y precaución y la EIA	111
2.4 Lineamientos metodológicos.....	115
2.5 Conclusiones	117
3. Aportes, Discusión y Trabajos Futuros.....	133
3.1 Aportes.....	133
3.2 Discusión	134
3.3 Propuestas para trabajos futuros	137
Bibliografía	138

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1: Modelo Entrada-Salida aplicado a la EIA.	23
Figura 2: Nivel de certeza de las predicciones en los EsIA.....	33
Figura 3: Ejemplo de jerarquía de sistemas complejos	52
Figura 4: Atractor de Lorenz.....	61
Figura 5: Construcción de la estrella de Koch	63
Figura 6: Simulación de la ecuación de diferencia logística para $X_0 = 0,3$ y $a = 3,3$	68
Figura 7: Simulación de la ecuación de diferencia logística para $X_0 = 0,30$ (color azul) y $X_0 = 0,31$ (color rojo) con $a = 3,7$	69
Figura 8: Esquema conceptual general de un sistema de información.....	72
Figura 9: Fuentes de incertidumbre al tratar de predecir el comportamiento de un fenómeno complejo.....	84
Figura 10: Esquema explicativo del principio de incompatibilidad	88
Figura 11: Ejemplos de jerarquías existentes en los sistemas complejos.	93
Figura 12: Diagrama descriptivo del proceso de EIA.....	100
Figura 13: Diagrama descriptivo del proceso de elaboración de un EsIA.....	101

Lista de abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura	Término
--------------------	----------------

EIA	Evaluación de Impacto Ambiental
EsIA	Estudio de Impacto Ambiental
DAA	Diagnóstico Ambiental de Alternativas
PMA	Plan de Manejo Ambiental
SIAC	Sistema de Información Ambiental Colombiano
MADS	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
ANLA	Autoridad Nacional de Licencias Ambientales
CGR	Contraloría General de la República
DNP	Departamento Nacional de Planeación

Introducción

En las últimas décadas, las preocupaciones ambientales han ido ganando cada vez más protagonismo en diferentes espacios de discusión. Desde la publicación de trabajos como el de Rachel Carson titulado “La primavera silenciosa” publicado en 1962, la humanidad ha pasado por cumbres de la Organización de Naciones Unidas para discutir cuestiones relacionadas con nuestro entorno natural y con el bienestar de los seres humanos y por la firma de convenios internacionales que han surgido de preocupaciones ambientales a nivel global, hasta llegar, por ejemplo, a hablar hoy en día del fenómeno del cambio climático como una amenaza para la supervivencia de la humanidad.

Fruto de este proceso, algunos sectores de la sociedad han alimentado el debate señalando como causante de las problemáticas ambientales que afrontamos hoy en día, entre ellas el cambio climático, a la insostenible relación que mantenemos con nuestro entorno natural que, sin ser necesariamente su función, nos provee de recursos a la vez que recibe y trata muchos de los residuos que generamos en nuestras actividades cotidianas.

El mejor ejemplo de esta relación es el modelo de producción de bienes y servicios en el que se basa nuestro sistema económico. Fox (2007) ha documentado y expuesto las consecuencias que tiene operar este modelo de producción al no tener en cuenta los límites inherentes al planeta en el que vivimos. En contraposición a este modelo que algunos denominan “depredador”, no es extraño encontrar posturas diametralmente opuestas que promueven una visión de conservación de los entornos naturales.

Sin embargo, resulta importante no perder de vista que los seres humanos dependemos de la naturaleza para nuestra supervivencia y, por lo tanto, no tenemos otra alternativa que su transformación. En este sentido, consideramos provechoso el planteamiento de Maya (1995) para quien “la solución al problema ambiental no consiste en saber 'conservar' sino en aprender a 'transformar bien’”. Este, precisamente, es el objetivo implícito de la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA).

Desde su incorporación en la Declaración de Río de Janeiro sobre Medio Ambiente y Desarrollo y en el Convenio de Diversidad Biológica, ambos de 1992, y su posterior adopción para el caso colombiano en la Ley 99 de 1993 mediante la creación de las licencias ambientales, la EIA se ha constituido como una herramienta para la toma de decisiones respecto de proyectos, obras o actividades que puedan ocasionar daños al ambiente (Toro, 2009). De esta forma, para Tennøy, Kværner y Gjerstad (2006), el objetivo principal de un proceso de EIA es generar información respecto de los cambios que puedan ocurrir en el ambiente como respuesta a la implementación de un proyecto, y

así servir de ayuda para el proceso de toma de decisión al informar a los encargados del proceso de decisión acerca de los posibles impactos de la actividad propuesta.

Este proceso, al que en Colombia se denomina licenciamiento ambiental, tiene como soporte técnico la elaboración de estudios ambientales dentro de los cuales el principal es el Estudio de Impacto Ambiental (EslA). Dicho estudio está contemplado dentro de la ley colombiana como la principal herramienta en los procesos de toma de decisión para cualquier proyecto que pueda causar impactos ambientales (Toro, Requena & Zamorano, 2010).

Una característica de los procesos de EIA, que es de particular interés para este trabajo de investigación, es la existencia de una etapa netamente predictiva, toda vez que se realiza analizando escenarios hipotéticos sin que exista aún el proyecto que motivó el inicio del proceso. Por lo tanto, según lo han advertido Duarte (2000) y Toro (2009), es de esperar que exista cierto grado de incertidumbre entre las predicciones hechas y los impactos ambientales que en efecto se presentan cuando se implementa el proyecto.

En este sentido, Tennøy et al. (2006) evidenciaron el carácter predictivo que tiene la EIA por medio de un estudio realizado entre los años 1990 y 2004 en Noruega en el que los expertos analizaron los impactos ambientales que se presentaron gracias a la implementación de grandes proyectos, en comparación con las predicciones hechas en los correspondientes EslA.

Teniendo en cuenta que del análisis de estos escenarios hipotéticos depende la decisión acerca del otorgamiento o no de la licencia ambiental necesaria para la ejecución de ciertos proyectos, el análisis y caracterización de la incertidumbre involucrada en el proceso se vuelve relevante; sin embargo, una revisión preliminar de las investigaciones realizadas en el país en torno a este tema indica que no se le ha dado el tratamiento que amerita.

De esta forma, justificamos el presente trabajo de investigación y planteamos la hipótesis que lo motiva: incorporar el concepto de incertidumbre en el proceso de EIA y particularmente en las actividades de identificación y valoración de impactos ambientales mejoraría las herramientas técnicas y el proceso en general y, como consecuencia, el proceso de modelamiento del que trata la EIA - modelar el comportamiento del ambiente -, toda vez que permitiría reducir y/o formalizar las diferentes incertidumbres involucradas.

En este sentido, presentamos como objetivo general la construcción de un marco teórico y la generación de los lineamientos metodológicos que permitan incorporar el concepto de incertidumbre en la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA). Por su parte, los correspondientes objetivos específicos que desarrollan este objetivo general son:

1. Construir un marco teórico para la incorporación del concepto de incertidumbre en la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA).
2. Generar lineamientos metodológicos que sean aplicables al diseño de metodologías para la elaboración de Evaluaciones de Impacto Ambiental (EIA) y que permitan incorporar el concepto de incertidumbre.

3. Analizar las metodologías usadas actualmente para la realización de Evaluaciones de Impacto Ambiental (EIA) con el fin de determinar si se ajustan a los lineamientos especificados.

En otras palabras, al establecer estos objetivos estamos planteando dos grandes problemas. Por un lado, entender el porqué y cuál es la importancia de considerar la incertidumbre involucrada en las predicciones que se hagan en el marco de una EIA y, por otro, identificar las implicaciones prácticas que la investigación teórica aporte en la solución del primer problema, proponiendo formas de llevar a la práctica estas implicaciones.

Para abordar estos problemas, proponemos partir de identificar y caracterizar el “sistema” acerca del cual se pretende realizar predicciones. En el caso de la EIA, se trata del ambiente. Las comillas que hemos usado tienen por objetivo llamar la atención sobre el error común de usar a la ligera el término de “sistema” para describir al ambiente, sin tener en cuenta el desarrollo conceptual que rodea dicho término.

Precisamente, cuando se habla del ambiente es usual que se le defina como un “sistema” - y además complejo - que para ser entendido amerita que se empleen enfoques “holísticos” e “integradores”. Sin embargo, de la misma forma que en su momento lo señaló Checkland (1993), hoy en día es usual que estos términos se utilicen sin que exista la suficiente claridad teórica - y mucho menos práctica - en cuanto al significado y las implicaciones que engloba el concepto.

Hablar del ambiente como un sistema complejo implica, en principio, dos consideraciones. En primer lugar, reconocer que existen sistemas no complejos y, en segundo lugar, la necesidad de entender - o al menos acordar - lo que es un “sistema” independientemente de su grado de complejidad. A continuación buscamos aportar elementos que suministren esta claridad teórica, a la vez que acordamos algunas definiciones de las que partirá este trabajo de investigación.

Lennart Ljung, profesor sueco reconocido por ser pionero en el área de la ingeniería dedicada a la identificación de sistemas, reúne varios aspectos importantes cuando define lo que es un sistema. En su forma más general, un sistema es el nombre que se le da a un objeto o colección de objetos cuyas propiedades queremos estudiar (Ljung & Glad, 1994), reconociendo que este objeto - o colección de objetos - se ve afectado por estímulos externos y que produce señales que pueden ser percibidas de manera directa o indirecta (Ljung, 1987). Con base en esta definición, es posible identificar 3 aspectos esenciales que caracterizan a cualquier sistema: 1) un objeto o un conjunto de objetos cuyas propiedades nos interesen, 2) los estímulos que este objeto o conjunto de objetos reciba de su entorno y 3) las señales que emita hacia él.

Al tratar con estos sistemas, Ljung y Glad (1994) reconocen que, gracias a nuestra curiosidad innata, es de esperar que queramos encontrar respuestas a preguntas que nos generen. Si bien los autores reconocen que muchas de estas preguntas pueden ser resueltas aplicando métodos experimentales, también advierten que estos métodos tienen limitaciones - costos y peligros asociados, inexistencia del sistema - que hacen inviable su aplicación en todos los casos.

Precisamente, consideramos que la aplicación de métodos experimentales resulta inviable en el caso del sistema “ambiente”, toda vez que, en caso de no ser exitosos, resultaría inimaginablemente costoso y peligroso - en términos económicos, socio-culturales y ecológicos - llevar a cabo experimentos sobre este sistema. En estos casos, Ljung y Glad (1994) resaltan la importancia de construir modelos de los sistemas que nos interese estudiar, para así poder comprenderlos y realizar predicciones sobre el comportamiento de los sistemas sin tener que incurrir en los costos y peligros que implicaría experimentar con ellos.

En este sentido, Ljung y Glad (1994) definen un modelo como una herramienta por medio de la cual podemos representar y lograr el entendimiento de los sistemas y que puede ser de varios tipos: mental, verbal, gráfico, de software, físico y matemático, entre otros. Con una definición tan amplia no resulta extraño que tantas “cosas” sean un modelo; al respecto, Meadows (2009) señala que (p. 86):

“Todo lo que creemos saber acerca del mundo es un modelo. Cada palabra y cada lenguaje es un modelo. Todos los mapas y las estadísticas, libros y bases de datos, ecuaciones y programas de computador... todos son modelos. También lo son las imágenes que yo formo del mundo en mi cabeza - mis modelos mentales.” [Traducción propia]

En relación con la EIA, algunos modelos frecuentemente utilizados - y que también caben en esta clasificación - son, por ejemplo, el modelo lingüístico por medio del cual se describe la línea base del área de influencia del proyecto: la matriz de doble entrada utilizada para identificar impactos ambientales, que intenta representar la forma en que se verá impactado el ambiente por un proyecto en particular; y la ecuación para el cálculo de importancia de cada impacto ambiental identificado, que corresponde a un modelo matemático que intenta representar la “gravedad” de cada impacto ambiental potencial.

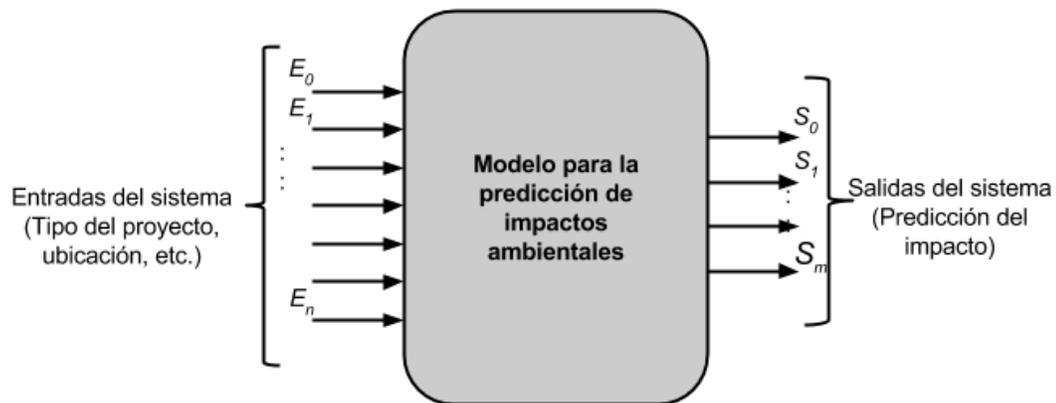
A pesar del gran rango de aplicación de los diferentes tipos de modelos, Meadows (2009) advierte una dificultad inherente a todos ellos: por definición son aproximaciones al fenómeno o sistema que se modela. Al respecto señala (p. 86):

“Ninguno de estos modelos es ni jamás será como el mundo real. A pesar de que nuestros modelos mentales son especialmente complejos y sofisticados, se quedan cortos a la hora de representar completamente el mundo. Sin embargo, usualmente, nuestros modelos tienen una congruencia muy alta con el mundo. Esta es la razón por la que somos una especie tan exitosa en la biósfera.” [Traducción propia]

Meadows (2009) llama la atención sobre un punto crucial. Teniendo en cuenta que todos los modelos que utilicemos son sólo aproximaciones del fenómeno que estamos modelando, el grado de utilidad del modelo - y, por ende, el grado de utilidad de las predicciones que hagamos basándonos en él - reside en el nivel de aproximación al fenómeno real. En este sentido, resulta importante considerar si los diferentes modelos usados en el marco de la realización de una EIA son lo suficientemente aproximados al fenómeno que se quiere modelar - la forma en que el ambiente se ve impactado por un proyecto.

Para abordar este aspecto, proponemos partir de elaborar un modelo genérico básico que permita representar el proceso de EIA. Resulta útil el modelo genérico descrito por Levine (1996) y que suele utilizarse para predecir el efecto que cierta acción particular tendrá sobre un sistema. Se trata de los modelos Entrada-Salida. Imagine que existe cierto operador o modelo que describe razonablemente bien la forma en que el ambiente se vería impactado por un proyecto; por supuesto, para entregar la predicción - i. e. la salida del sistema -, el modelo requeriría que le sea suministrada cierta información como puede ser el tipo de proyecto y su ubicación específica (Figura 1).

Figura 1: Modelo Entrada-Salida aplicado a la EIA.



Fuente: Elaboración propia a partir de Levine (1996)

Teniendo en cuenta nuestro interés por analizar y comprender los factores que inciden en el nivel de certeza involucrado en la salida del modelo - es decir, los factores que determinan su nivel de utilidad -, esta conceptualización nos permite plantear una estructura a partir de la cual organizar el desarrollo de este trabajo de investigación. Esta estructuración parte de reconocer que existen factores que pueden incidir en la predicción entregada por el modelo tanto en el modelo mismo, como en la información que se le suministra. En este sentido, este trabajo está organizado de la siguiente manera.

Un primer capítulo dedicado a la exposición del resultado del proceso de construcción de un marco teórico que da las bases i) para acordar a qué nos referimos por incertidumbre a lo largo del trabajo (sección 1.1), ii) para comprender más detalladamente el porqué de la importancia de tener en cuenta el concepto de incertidumbre cuando se realiza una EIA (sección 1.2) y iii) para incorporar el concepto de incertidumbre en la EIA. Acerca de este último aspecto, partimos del modelo Entrada-Salida propuesto y analizamos, en relación con el concepto de incertidumbre, tanto el tipo de fenómeno que se intenta modelar en una EIA - la afectación del ambiente por un proyecto - (secciones 1.3, 1.4.1 y 1.4.2), como algunas particularidades propias de la información que se le suministren al modelo que se construya y que vale la pena considerar (sección 1.4.3).

Para este análisis hacemos referencia a dos paradigmas científicos. Por un lado, el paradigma mecanicista teniendo en cuenta que, como lo señalan Jay, Jones, Slinn y Wood (2007), el pensamiento racionalista - el método de razonamiento analítico propio del mecanicismo - fue una de las características fundamentales que marcó el origen de la

EIA y de los EsIA a finales de la década del 60 y, por otro lado, incorporamos el paradigma de la complejidad buscando esclarecer las referencias que suelen hacer al ambiente como un sistema complejo y obedeciendo sospechas razonables en el sentido de que este es un paradigma científico más adecuado para abordar un fenómeno como el que se trata de modelar en una EIA.

A partir de este análisis teórico, este primer capítulo finaliza con algunas reflexiones y conclusiones acerca de las implicaciones sobre el manejo conceptual y práctico de la incertidumbre (sección 1.5). Estas conclusiones incluyen la identificación de potenciales fuentes de incertidumbre cuando se trata de predecir el comportamiento de fenómenos complejos en general y una propuesta de clasificación de dichas fuentes de incertidumbre.

A continuación, el segundo capítulo recopila las implicaciones prácticas del marco teórico expuesto, aplicado al caso particular de la EIA. En este sentido, parte de establecer las implicaciones de describir al ambiente como un sistema complejo (sección 2.1), continúa con la identificación de los momentos a lo largo del proceso de EIA en los que potencialmente podría manifestarse las fuentes de incertidumbre identificadas previamente (sección 2.2), analiza la pertinencia e importancia de aplicar los Principios de Prevención y Precaución a la toma de decisiones ambientales (sección 2.3), expone con el resultado del proceso de construcción de un conjunto de lineamientos metodológicos que pueden guiar la incorporación del concepto de incertidumbre a lo largo del proceso de EIA (sección 2.4) y finaliza con una síntesis de las conclusiones más importantes (sección 2.5). Conforme realizamos la exposición de estos lineamientos metodológicos, también analizamos, en relación con cada lineamiento, la forma como se está desarrollando el proceso actualmente en el país.

Por último, el tercer capítulo de este trabajo presenta algunas conclusiones de tipo más general y sintetiza los principales aportes de este trabajo de investigación, a la vez que dedica algunas líneas a plantear una discusión de orden epistemológico y algunas ideas para la realización de trabajos de investigación futuros.

La metodología utilizada para el desarrollo del trabajo cuyo resultado se plasma en este documento incluyó una primera etapa de definición y estructuración del problema que en principio se quería abordar - proceso que realizamos de manera iterativa y cada vez más refinada a lo largo de toda la investigación -, seguida de la recopilación y análisis de los resultados de trabajos de investigación previos elaborados desde distintas áreas del conocimiento. El resultado de este proceso es el marco teórico al que corresponde el primer capítulo de este trabajo.

Posteriormente, la aplicación de este marco teórico al caso particular de la EIA y particularmente el proceso de generación de los lineamientos metodológicos expuestos fue realizada mediante sesiones de debate en las que cada lineamiento fue el resultado un proceso de construcción activa y participativa en el que participó el autor junto con expertos en el campo de la EIA y en el campo de técnicas para el manejo de la incertidumbre.

Si bien reconocemos que este documento es el resultado de una investigación teórica en su mayor parte - ya hemos resaltado las dificultades que implica realizar experimentos cuando el objeto de estudio no puede reducirse al entorno de un laboratorio -, nos hemos

esforzado por enfocar esta revisión de tal forma que sean evidentes sus implicaciones sobre el mejoramiento del proceso de EIA e incluso sobre el entendimiento que tengamos sobre la realidad en la que vivimos.

1. Fundamentos teóricos y conceptuales

1.1 ¿Qué entendemos por incertidumbre?

Aunque el estudio del concepto de incertidumbre se empezó a abordar sistemáticamente a lo largo del siglo XX (Lindley, 2006), los interrogantes que plantea han estado presentes desde los tiempos de Sócrates y Platón, quienes dudaban de que el conocimiento, sin importar qué tan elaborado estuviera, pudiera reflejar de manera suficiente la realidad (Tannert, Elvers & Jandrig, 2007).

Etimológicamente, la palabra “incertidumbre” se deriva de 2 raíces latinas: el prefijo de negación *in* y la palabra *certitudo* que, a su vez, proviene de las palabras *certus* que significa cierto y del sufijo *tudo* que indica cualidad¹. En la actualidad, la palabra “incertidumbre” se usa para referirse a la falta de certeza o conocimiento seguro y claro de algo².

Es usual tratar de distinguir entre aquellas situaciones o afirmaciones de cuya falsedad o veracidad estamos seguros y aquellas de las que no. En principio, podría parecer que el límite entre uno y otro conjunto - entre el conjunto de cosas de cuya veracidad (o falsedad) estamos seguros y el conjunto de cosas de cuya veracidad (o falsedad) no estamos seguros - depende del nivel de conocimiento de cierta situación en particular; sin embargo, a pesar de lo extensivo que pueda ser el conocimiento que se posea, hay situaciones de cuya veracidad o falsedad nunca se podría estar completamente seguros (Lindley, 2006). El concepto de incertidumbre se convierte en un adjetivo que caracteriza a estas situaciones, fenómenos o afirmaciones.

Un ejemplo típico de esta clase de situaciones es la afirmación “mañana lloverá”, analizada por Lindley (2006). La utilidad de este ejemplo radica en que es una afirmación cotidiana de la que, sin importar qué tanto conocimiento se reúna - consultando a expertos, usando instrumentos especializados, etc. -, nunca se podrá estar completamente seguros ni de su veracidad y ni de su falsedad.

¹ Obtenido de <http://etimologias.dechile.net/?incertidumbre>

² Obtenido de <http://lema.rae.es/drae/?val=incertidumbre>

De esta forma, el concepto de incertidumbre puede verse como una característica de la relación que se establece con los fenómenos o situaciones que suceden en el mundo (Lindley, 2006). Lubinski (1998) describe esta misma relación en términos del concepto de azar identificando dos categorías:

“Sea el azar epistemológico (el azar con minúscula) el nombre que le damos a nuestra ignorancia – léase leyes insuficientes, débil potencia de cálculo, torpes observaciones - y sea el azar ontológico (el Azar con mayúscula) una entidad metafísica que representa la contingencia pura que actúa ciegamente en el universo” (p. 67).

Esta distinción sugiere la existencia de distintos tipos de incertidumbres, por lo que resulta oportuna una revisión de los abordajes que se le ha dado al concepto desde distintas áreas del conocimiento.

Desde el campo de las matemáticas, Girón (2001) hace referencia a 2 tipos generales de incertidumbre: i) aquella resultado de nuestra ignorancia y que puede “eliminarse y convertirse en certeza absoluta por medio de algún procedimiento determinístico - como pudiera ser recurriendo, por ejemplo, a alguna rama de las matemáticas o la lógica” (p. 83) y ii) “aquella que solamente se puede reducir sin llegar necesariamente a la certeza absoluta” (p. 83). O'Hagan (2004), desde la Teoría de la Probabilidad - área del conocimiento que se enfoca en la cuantificación de la incertidumbre por medio de probabilidades -, identifica estos mismos tipos de incertidumbre, pero les denomina “incertidumbre epistémica” e “incertidumbre aleatoria”, respectivamente.

Por el lado de las ciencias de la información, Kamal y Burkell (2011) reconocen una incertidumbre que denominan “interna”, que hace referencia a la falta de conocimiento respecto de cierta situación, y una incertidumbre “externa”, que corresponde a aquellas situaciones en las que no se puede generar una situación de certeza absoluta reuniendo más conocimiento.

De particular interés para este trabajo, el Instituto de Medicina de Estados Unidos (IOM, por sus siglas en inglés), en un trabajo que trata acerca de la toma de decisiones ambientales en escenarios inciertos, define 2 tipos de incertidumbre: incertidumbre epistémica e incertidumbre aleatoria o exógena. La incertidumbre epistémica se refiere a los límites del conocimiento científico existente que se refleja en los modelos que usamos y que, en teoría, puede ser reducida con investigación adicional y la incertidumbre aleatoria o exógena que hace referencia a incertidumbres que no pueden ser reducidas recolectando más información y que se generan debido a variaciones inherentes del sistema bajo estudio, que no pueden ser controladas por los tomadores de decisiones (IOM, 2013).

En general, resulta evidente el patrón que lleva a clasificar la incertidumbre de acuerdo a sus causas en 2 grandes grupos. Un primer grupo que incluye todas aquellas

incertidumbres que son consecuencia de la ignorancia de observador y que pueden ser reducidas o incluso eliminadas por medio del mejoramiento del conocimiento de cierta situación, y otro grupo que contempla todas aquellas incertidumbres que son resultado de un comportamiento azaroso del universo y que, en la práctica, nunca podrán ser eliminadas por completo.

A manera de ilustración, consideramos útiles los ejemplos expuestos por Kahneman y Tversky (1982a) citados por Kamal y Burkell (2011):

“Alguien que afirme ‘Creo que New York está situada al norte de Roma, pero no estoy seguro’ está expresando incertidumbre interna, ya que las latitudes relativas de las 2 ciudades es un hecho conocido que quien afirma no conoce (Roma está un poco al norte de New York). Por otro lado, alguien que afirme ‘puede que mañana encuentres a John en casa si llamas en la mañana’ está expresando incertidumbre externa, ya que John podría o podría no estar en casa mañana en la mañana y nadie, ni siquiera John, puede asegurar qué va a pasar hasta que el evento en efecto suceda (p. 386). [Traducción propia]

Aunque existen otras clasificaciones en torno al concepto de incertidumbre³, este trabajo se fundamenta en las categorías expuestas previamente.

En un contexto de predicciones de impactos ambientales potenciales que determinada obra o proyecto puede ocasionar en el ambiente, la incorporación de estos conceptos puede entenderse como sigue. Por un lado, explorar la forma en que las denominadas incertidumbres internas o epistémicas pueden ser reducidas - con miras a realizar predicciones de impactos ambientales más acertadas -, mientras que, por otro lado, se deben adoptar estrategias apropiadas dentro del proceso de EIA que partan de reconocer la existencia de incertidumbres externas, aleatorias o exógenas que no pueden ser eliminadas por completo. Este es el enfoque que se aborda a lo largo de este trabajo de investigación.

Antes de iniciar un análisis más detallado de las implicaciones que tiene para el proceso de EIA la incorporación del concepto de incertidumbre, resulta pertinente hacer algunas aclaraciones respecto de las estrategias más usadas por tomadores de decisión para el manejo de estos 2 tipos de incertidumbres.

³ Otras clasificaciones tienen en cuenta, por ejemplo, aquellas incertidumbres que se refieren a la subjetividad e imprecisión de la forma como interpretamos el conocimiento disponible - e. g. “mañana lloverá”: ¿A qué nos referimos con “lloverá”?, ¿basta una llovizna o qué cantidad mínima de agua lluvia será suficiente?, ¿a qué lugar estamos aplicando la afirmación?, ¿a qué nos referimos con “mañana”?, ¿a qué rango horario hacemos referencia? (Lindley, 2006, p. 2) -, otras incorporan el hecho de que personas diferentes tienen incertidumbres diferentes y algunas incluyen incertidumbres derivadas de la aplicación de las normas morales. Recomendamos consultar los trabajos de Lindley (2006), Tangen (2014, marzo) y Tannert et al. (2007).

Para el primer escenario - aquél en que se busca hacer predicciones más certeras mediante la reducción y eliminación de las incertidumbres internas o epistémicas -, vale la pena hacer una mención a propósito de la gestión de riesgos, que se ha convertido en una herramienta para el análisis de cierto tipo particular de situaciones inciertas. Como señalan Farber (2003) y Callon, Lascoumes y Barthe (2009), cuando se trata de cuestiones ambientales no resulta adecuado aplicar la evaluación de riesgo tradicional debido a que estas situaciones se caracterizan por contar con un universo de muestras pequeño, por lo que la repetición - de la situación o fenómeno - y, por tanto, la estimación de una medida probabilística no son posibles (Choi, 1993).

En el segundo caso - aquél en que existen incertidumbres externas, aleatorias o exógenas que no pueden ser eliminadas completamente -, Lindley (2006) señala que una estrategia usual consiste en ignorar esta incertidumbre (es usual que a los tomadores de decisión les incomoden los estados inciertos), lo que genera como resultado un proceso de toma de decisión sesgado bajo un sentido de certidumbre artificial (Kamal & Burkell, 2011). Por supuesto, tal y como lo advierten Loucks, Van Beek, Stedinger, Dijkman y Villars (2005), tener en cuenta la incertidumbre no facilita el proceso de decisión, pero ignorarla sería equivalente a ignorar la realidad.

De esta forma, el objetivo de este trabajo de investigación es generar lineamientos que guíen el proceso de diseño o adaptación de metodologías para los procesos de EIA y particularmente para las etapas de identificación y valoración de impactos ambientales, que sean el resultado de la construcción de un marco teórico que permita incorporar el concepto de incertidumbre dentro del proceso de toma de decisión respecto de proyectos que potencialmente impacten el ambiente.

Antes de realizar dicha construcción, la siguiente sección aborda la relación que existe entre el concepto de incertidumbre y la EIA; posteriormente el marco teórico permite entender el porqué de la existencia de estas incertidumbres y, por tanto, la forma en que la EIA puede mejorarse con el fin de hacer más eficaz - i.e. eficiente y efectivo - todo el proceso de toma de decisión.

1.2 La EIA como una herramienta de carácter predictivo

La EIA se define como un proceso jurídico-administrativo que tiene por objetivo la toma de decisiones respecto de proyectos, obras o actividades que puedan generar impactos

ambientales significativos⁴ (Toro, 2009). Dentro de este proceso, algunas actividades como la elaboración de un Diagnóstico Ambiental de Alternativas (DAA), el desarrollo de un EsIA y la preparación de un Plan de Manejo Ambiental (PMA) se realizan analizando escenarios hipotéticos en los que el proyecto, obra o actividad - y, por tanto, sus impactos - no se ha materializado. En este sentido, la EIA se constituye como una herramienta para la toma de decisiones de carácter predictivo.

Este ejercicio de analizar escenarios hipotéticos es, por naturaleza - i. e. por el hecho de ser una predicción -, un ejercicio que involucra un alto componente de incertidumbre. Farber (2003) y Bodansky (1991) señalan que el estudio de cuestiones ambientales es uno de los campos que más incertidumbres involucra. Esto resulta evidente al analizar algunos de los interrogantes que plantearon en su momento: ¿Las continuas emisiones de dióxido de carbono y otros GEI (Gases de Efecto Invernadero) conducirán al calentamiento global?, ¿Es la lluvia ácida la responsable de la disminución de los bosques templados en América del Norte?, ¿Las redes de deriva oceánica amenazan la administración sostenible de la pesca?, ¿Cuáles son los efectos para el ecosistema marino derivados de la quema de desechos "a bordo"?

En este mismo sentido, consideramos ilustrativo el ensayo realizado por Callon et al. (2009) en el que llaman la atención, particularmente, sobre impactos ambientales altamente inciertos que tendrían proyectos como el enterramiento de desechos radioactivos o la instalación de líneas eléctricas de alta tensión. En cuanto al enterramiento de desechos radioactivos como estrategia para su disposición final, los autores señalan impactos que el proyecto tendría sobre la estabilidad económica de las regiones afectadas, como consecuencia de las asociaciones negativas que las personas harían entre tales desechos y los productos agrícolas de la región en cuestión. En el caso de la instalación de líneas eléctricas, los impactos tendrían que ver con la disminución del bienestar de algunas personas, gracias a su interacción con los campos electromagnéticos asociados a las líneas eléctricas, lo que podría acarrear síntomas como dolores de cabeza constantes, insomnio e incluso aumento de las tasas de diferentes tipos de cáncer.

La EIA no escapa a esta realidad. Particularmente analizando los EsIA - el componente técnico de la E.A -, Toro (2009) y Tennøy, Kværner y Gjerstad (2006) reconocen el carácter predictivo de las actividades principales de estos estudios, especialmente la identificación y valoración de impactos ambientales potenciales. La utilidad de estas predicciones depende, entonces, del nivel de incertidumbre involucrada, por lo que es válido (y necesario) indagar acerca del nivel de exactitud de estas predicciones.

⁴ En Colombia, un impacto ambiental se define como "cualquier alteración en el sistema ambiental biótico, abiótico y socioeconómico, que sea adverso o beneficioso, total o parcial, que pueda ser atribuido al desarrollo de un proyecto, obra o actividad" Decreto 1076 de 2015, Art. 2.2.2.3.1.1

Al respecto, el estudio realizado por Tennøy et al. (2006) entre los años 1990 y 2004 en Noruega es un referente importante. En dicho estudio, Tennøy y sus colaboradores revisaron 22 EsIA de grandes proyectos que, en su momento, incluyeron predicciones respecto de los impactos que los evaluadores creían que estos proyectos ocasionarían en el transporte de las personas y en la polución del aire y de las fuentes de agua en el área de influencia identificada. Finalizado el estudio, los autores señalan que el empleo de la EIA, como herramienta para la toma de decisión respecto de estos proyectos, no fue satisfactorio debido a que sólo el 42% de las predicciones estudiadas fueron clasificadas como “exactas”⁵, mientras que el 29% fueron clasificadas como “casi exactas”⁶ y el 29% restante fueron clasificadas como “inexactas”⁷ (Figura 2).

Teniendo en cuenta que existen limitaciones que impiden realizar un estudio similar para el caso colombiano y las advertencias que han hecho tanto entidades estatales como expertos académicos acerca de la baja calidad de los EsIA que se realizan en el país (Toro, Requena & Zamorano, 2010; Martínez, 2013), consideramos válido asumir que, en el mejor de los casos, el escenario colombiano sería igual al escenario expuesto por Tennøy et al. (2006).

Estableciendo que la calidad de los EsIA, en términos de su exactitud, no es buena - aproximadamente el 60% de las predicciones de impactos ambientales difieren en más de un 10% de los impactos que, en efecto, se ocasionan -, resulta importante entender las razones que ocasionan la inexactitud de estas predicciones.

De manera general, el IOM (2013), Tennøy et al. (2006) y De Jongh (1988, citado en Tennøy et al., 2006) identifican los siguientes factores:

- Ausencia de transparencia durante todo el proceso de EIA
- Negligencia y burocracia que impide la inclusión de información existente
- Procesos inadecuados de comunicación a lo largo del proceso de EIA
- Sesgos y subjetividad propia de las personas que participan en el proceso de EIA
- Errores en los datos que se ingresan en los modelos o métodos
- Características inherentes al fenómeno o sistema que se está tratando de predecir
- Limitaciones propias de los modelos utilizados

Particularmente para el caso colombiano, Martínez (2013) llama la atención sobre las siguientes causas:

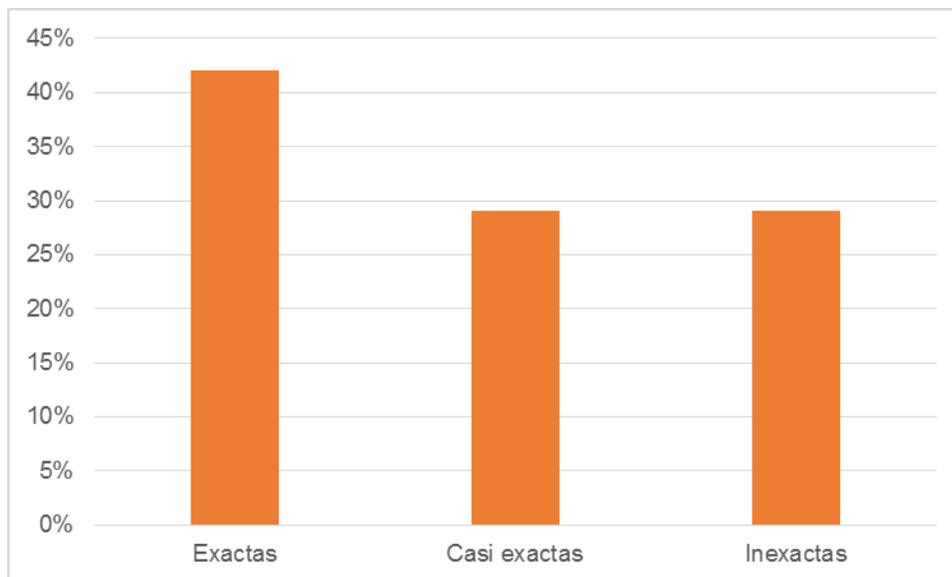
⁵ Difirieron menos de +/-10% del impacto realmente generado.

⁶ Difirieron entre un +/-10% y +/-25% del impacto realmente generado.

⁷ Difirieron más de +/-25% del impacto realmente generado.

- Modificación frecuente de la normatividad⁸
- Falta de claridad en los tiempos de transición para la aplicación de normas⁸
- Traslape de competencias entre las entidades que expiden los permisos de investigación
- Ausencia de metodologías oficiales para los procesos de participación ciudadana, zonificación ambiental, identificación y valoración de impactos ambientales y seguimiento y control
- El poco tiempo que se tiene para la realización de los estudios y para la toma de la decisión por parte de la autoridad ambiental⁸
- Bajo nivel de conocimiento técnico de las comunidades
- Falta de correspondencia entre la línea base de los EsIA, la valoración y categorización de los impactos ambientales, las medidas establecidas en los PMA y el seguimiento y control
- Manipulación de resultados para favorecer el proyecto
- Realización de los EsIA por parte de personal no calificado

Figura 2: Nivel de certeza de las predicciones en los EsIA.



Fuente: Elaboración propia a partir de Tennøy et al. (2006)

Si bien este listado evidencia diferentes causas que llevan a la generación de incertidumbres en las predicciones de impactos ambientales, para el desarrollo de este trabajo de investigación el análisis se concentra principalmente en las limitaciones que

⁸ Aunque estas causas parecieran en principio estar relacionadas únicamente con dificultades administrativas del proceso, vale la pena tener en cuenta que bien pueden influir en el tiempo y la rigurosidad que se dedique para realizar un EsIA, influyendo, de esta forma, en el nivel de incertidumbre interna y externa involucradas en el producto final.

exhiben la información y los modelos en los que se basan las predicciones de la magnitud de los impactos ambientales que cierto tipo de proyectos podrían generar en el ambiente - i. e. incertidumbres internas o epistémicas. Estas limitaciones están estrechamente relacionadas con las características propias del fenómeno o sistema que se está tratando de predecir - i. e. incertidumbres externas, aleatorias o exógenas.

Teniendo en cuenta que partimos de la hipótesis de que la EIA puede, mediante la incorporación del concepto de incertidumbre, mejorarse como herramienta para la toma de decisiones respecto de proyectos que impacten el ambiente, surgen varios interrogantes que son abordados en esta tesis: ¿Cuáles son las razones por las que las herramientas técnicas usadas en el desarrollo de una EIA no están incorporando el concepto de incertidumbre?, ¿cómo funciona el sistema que se está tratando de predecir - i. e. el ambiente? y ¿cuáles deberían ser los lineamientos que debería satisfacer la EIA con miras a incorporar el concepto de incertidumbre?.

En este orden de ideas, en la siguiente sección desarrollamos el marco teórico que permite, posteriormente, formular lineamientos para el diseño de metodologías para la elaboración de EsIA y, en general, para la mejora de todo el proceso de EIA. El punto de partida será el paradigma⁹ científico mecanicista, toda vez que, como lo señalan Jay, Jones, Slinn y Wood (2007), el pensamiento racionalista - el método de razonamiento analítico propio del mecanicismo - fue una de las características fundamentales que marcó el origen de la EIA y de los EsIA a finales de la década del 60 en Estados Unidos.

1.3 El mecanicismo como paradigma científico

Durante los siglos XVI y XVII se dieron cambios trascendentales en campos como la física y la astronomía que llevaron a lo que se ha denominado una "revolución científica". Los protagonistas del comienzo de dicha revolución fueron el astrónomo polaco Nicolás Copérnico (1473 – 1543), el astrónomo, filósofo y matemático italiano Galileo Galilei (1564 – 1642), el filósofo inglés Francis Bacon (1561 – 1626) y el filósofo, matemático y físico francés René Descartes (1596 - 1650), quienes tenían por interés principal la descripción (y reducción) matemática de la naturaleza, objetivo explícito en las palabras de Galileo (Capra, 1992):

“La filosofía está escrita en el gran libro que se abre ante nosotros, pero para entenderlo tenemos que aprender el lenguaje y descifrar los caracteres con los

⁹ Meadows (2009) define un paradigma como un conjunto de creencias transversales a toda una comunidad, que todos sus integrantes conocen, a pesar de no estar declaradas explícitamente, y que determinan su manera de pensar y actuar.

que está escrito. El lenguaje es la matemática y los caracteres son los triángulos, círculos y demás figuras geométricas” (p. 57).

Aunque estas palabras parecieran reflejar solamente un interés por entender los fenómenos que suceden a nuestro alrededor y aquellos de los que hacemos parte, figuras como Francis Bacon le inyectaron otros ingredientes más agresivos y ambiciosos a esta forma de pensar; evidencia de ello son las palabras del pensador inglés (Merchant, 1980 citado en Capra, 1992):

“La naturaleza tiene que ser acosada en sus vagabundeos, sometida y obligada a servir, esclavizada, reprimida con fuerza y torturada hasta arrancarle sus secretos” (p. 58).

René Descartes, por su parte, se propuso crear un sistema de pensamiento totalmente nuevo impulsado por su creencia de tener vocación para distinguir la verdad del error en todos los campos de estudio (Capra, 1992). Luego de un complejo (al menos para aquellos que no somos cercanos a la filosofía) proceso de deducción lógica, Descartes concluyó que los cuerpos que componen el mundo físico son máquinas, ya que las únicas características claras y distintas que tienen estos cuerpos - i. e. aquellas características que los hacen verdaderos - es que son cosas extensas y móviles; extensas haciendo referencia a que poseen tres dimensiones y móviles debido al hecho de que pueden transportarse de un lugar a otro¹⁰ (Rojas, 2006).

Gracias a esto, Descartes estableció que todos aquellos cuerpos que componen el mundo físico son máquinas, por lo que a esta filosofía, que terminó convirtiéndose en el paradigma fundamental de la ciencia moderna, se le denominó "mecanicismo". Quizá la principal contribución de Descartes a la ciencia fue la introducción del método de razonamiento analítico denominado racionalismo - una de las características fundamentales que marcó el origen de la EIA y los EsIA -, que propone dividir los pensamientos y problemas en cuantas partes sea posible y luego disponerlas en un orden lógico (Capra, 1992).

Esta revolución científica fue completada por dos grandes figuras del siglo XVIII: el físico y filósofo inglés Isaac Newton (1642 – 1727) y el filósofo y matemático alemán Gottfried Wilhelm Leibniz (1646 - 1716) (Capra, 1992; Baranger, 2000).

A pesar de los grandes aportes de Descartes, fueron Isaac Newton y Leibniz quienes, más tarde y casi simultáneamente, inventaron el cálculo, logrando realizar el sueño cartesiano de Descartes y completando así la revolución científica al dar las bases para

¹⁰ Para una mayor profundidad acerca de este proceso deductivo, recomendamos revisar el trabajo de Rojas (2006).

la configuración de un marco de pensamiento, en el que el universo no es más que un sistema mecánico regido por un conjunto de leyes matemáticas exactas (Capra, 1992).

Tal concepción se caracterizó por procurar reducir la naturaleza a un conjunto de propiedades medibles o contables, excluyendo de la ciencia propiedades como el color, el sonido, el olor o el sabor al calificarlas de “proyecciones subjetivas” (de ahí nuestra obsesión por la cuantificación). De acuerdo a Laing (1982 citado en Capra, 1992), esto conllevó grandes pérdidas ya que, al excluir la vista, el oído, el sabor, el tacto y el olfato, se obvia también la estética, el sentido ético, los valores, la calidad, la forma, los motivos, el alma, la conciencia y el espíritu.

El cálculo - inventado simultáneamente por Newton y Leibniz -, que se fundamenta en esta descripción cuantitativa, se convirtió en la herramienta más poderosa del arsenal matemático de la ciencia desde la propia invención de los números. Gracias al cálculo fue posible desarrollar herramientas como las integrales, las ecuaciones diferenciales y la expresión de funciones mediante la expansión de series, entre otras, que han permitido la solución de una asombrosa variedad de problemas en todas las áreas del conocimiento cuantitativo (Baranger, 2000).

Fruto de esta forma de pensar fue la organización de las sustancias químicas simples irreductibles que realizó el químico, biólogo y economista francés Antoine Lavoisier (1743 - 1794), la clasificación taxonómica de especies llevada a cabo por el botánico y zoólogo sueco Carlos Linneo (1707 - 1778) (Maya & Ángel, 2002) e incluso los aportes que más tarde realizaría el físico Albert Einstein, impulsado por una obsesión determinista que quedó plasmada en su famosa frase “Dios no juega a los dados”.

Tal paradigma llegó a aplicarse al movimiento continuo de los cuerpos líquidos, a las vibraciones de los cuerpos elásticos, a la teoría del calor - energía generada por un complicado movimiento y roce de los átomos y moléculas -, y siempre funcionó; inclusive, se aplicó a las entonces nacientes ciencias sociales, de lo que son un ejemplo claro los trabajos del filósofo inglés John Locke, quien hizo famosa la metáfora de la tabula rasa: un recién nacido se comparaba con una pizarra en blanco sobre la que se imprimiría el conocimiento una vez que fuese adquirido por medio de la experiencia sensible (Capra, 1992).

Otro gran aporte de este enfoque mecanicista es la gran importancia que se le ha dado a la realización de mediciones cada vez más exactas, particularmente en campos como la metrología¹¹. Estas mediciones cuidadosas con incertidumbres identificadas y cuantificadas son las que permiten que, por ejemplo, 2 componentes diferentes del motor

¹¹ área del conocimiento que se concentra en el mejoramiento permanente de los estándares y la reducción de las incertidumbres.

de un vehículo fabricados en diferentes países encajen o sean compatibles, así como también permiten aumentar los estándares de seguridad de un transbordador espacial (Kirkup & Frenkel, 2006).

Durante los siglos XVII, XVIII y XIX la física aprendió a trabajar con problemas que involucraran 2 variables, lo que permitió el desarrollo del teléfono, la radio, el automóvil, el aeroplano, la fotografía, las turbinas, el motor diésel y la planta moderna de energía hidroeléctrica, entre otros, que son esenciales para el estilo de vida actual (Weaver, 1948). Prácticamente todo el mundo que conocemos actualmente - tanto el que percibimos materialmente en las grandes ciudades y nuestros sistemas de transporte y de comunicación, como aquél representado en nuestros procedimientos políticos y administrativos - es resultado de la aplicación de este paradigma científico mecanicista (Checkland, 1993).

Para los científicos de los siglos XVIII y XIX, el tremendo éxito del modelo mecanicista corroboró la teoría según la cual el universo era verdaderamente un enorme sistema mecánico, que funcionaba de acuerdo a las leyes de movimiento newtonianas. La idea de la perfecta máquina del mundo ideada por Descartes fue considerada un hecho comprobado y Newton se convirtió en su símbolo (Capra, 1992).

Por todo esto, no debería sorprender que los teóricos se hayan convencido, inconscientemente, de que esta es la forma cómo funciona el mundo. Como consecuencia, este paradigma permeó toda la ciencia del siglo XX y se reflejó en los currículos universitarios y en los textos de enseñanza (esos con los que nos enseñaron a muchos de nosotros y que se siguen utilizando aun hoy en día) que moldearon la forma de pensar de los europeos, siendo esta extendida a gran parte del resto del mundo con la colonización (Baranger, 2000; Maya & Ángel, 2002). Los supuestos iniciales en los que se basa el cálculo se olvidaron, convirtiendo en absolutas las verdades condicionales que se podían establecer con él (Baranger, 2000, p.4):

"Todo puede reducirse a pequeños segmentos rectos, por lo que todo puede ser entendido y analizado a una escala lo suficientemente fina. Puede que requiera mucho trabajo, a veces puede que ni siquiera valga la pena, pero, en principio, tenemos poder absoluto". [Traducción propia]

Esta forma de pensar sumada al tremendo poder y éxito de la mecánica de Newton¹² resultaron en la declaración fundamental del determinismo - uno de los supuestos del mecanicismo - establecida por el astrónomo, físico y matemático francés Pierre-Simon

¹² Nombre que se le dio al estudio del movimiento de partículas y cuerpos sólidos cuyo comportamiento obedece las leyes de movimiento formuladas por Isaac Newton.

Laplace (1749 - 1827) en el siglo XVIII y que es una consecuencia matemática de la mecánica Newtoniana (Firth, 1991):

“Dadas las posiciones y velocidades precisas de todas las partículas en el universo y el suficiente poder de cálculo, sería posible determinar el curso entero de la historia” (p. 1565). [Traducción propia]

El análisis de esta declaración - y, en general, del paradigma científico mecanicista - permite establecer la relación que existe entre la mayor parte de la ciencia moderna y el concepto de incertidumbre. Aunque solo el mismo Laplace sabe con certeza lo que quiso decir con tal afirmación, sus palabras dejan la sensación de que el mecanicismo representaba la forma de equiparar lo desconocido únicamente con nuestra falta de conocimiento sobre el evento o fenómeno en cuestión - el conocimiento de las variables y de las leyes que determinan su comportamiento -, sin preocuparse por nuestra capacidad para adquirir o desarrollar dicho conocimiento. De esta forma, se desconocen todas las incertidumbres externas, aleatorias o exógenas planteadas anteriormente y que se caracterizan porque no pueden ser eliminadas por completo.

A pesar de todos los éxitos científicos y avances tecnológicos que se han alcanzado de la mano del mecanicismo, con el pasar de los años, desde diferentes áreas del conocimiento se han empezado a evidenciar algunas limitaciones e inconvenientes que acarrea esta forma de concebir el mundo.

Por el lado de las ciencias sociales, la historiadora de la ciencia Caroly Merchant ha advertido que, a diferencia de como sucede con la visión mecanicista del mundo, “mientras se pensó en la tierra como algo vivo y sensible, podía considerarse como falta de ética del comportamiento humano el llevar a cabo actos destructivos contra ella” (Capra, 1992, p. 64); en este mismo sentido, Maya y Ángel (2002) señalan que este paradigma dio las bases para que el pensamiento moderno, basado en un derecho omnímodo¹³ del ser humano sobre la naturaleza, se organizara como una maquinaria ciega de destrucción.

Desde las ciencias “duras”, Capra (1992) reseña cómo, mientras el mecanicismo permeaba prácticamente todas las áreas del conocimiento, descubrimientos y nuevas formas de pensar como la teoría electromagnética, la teoría de la evolución, la termodinámica y la mecánica cuántica empezaron a preparar el terreno para una nueva corriente de pensamiento.

En campos como la medicina y la biología, los avances han llevado a aceptar que, cuando se trata de organismos vivos, el problema más significativo es que estos tienden

¹³ Que lo comprende todo.

a generar situaciones en las que media docena o incluso varias docenas de variables están cambiando simultáneamente y están sutilmente interconectadas, por lo que estos organismos presentan situaciones en las que las cantidades esencialmente importantes son o bien no cuantitativas o han eludido de alguna manera la identificación o la medición hasta la fecha (Weaver, 1948).

Quizá la limitación más importante del mecanicismo en relación con el concepto de incertidumbre tiene que ver con dos fallas importantes que, a la luz de descubrimientos científicos recientes, presenta la hipótesis de Laplace. Dicha hipótesis supone que el poder de cálculo requerido se incrementa únicamente en una proporción similar al número de partículas y a la cantidad de tiempo en el futuro para el que se va a hacer la predicción; sin embargo, en algunos casos y contrario a la suposición, este crecimiento es exponencial. Las fallas residen en las palabras "precisas" y "suficiente" (Firth, 1991). Para conservar su utilidad, la hipótesis de Laplace requiere, entonces, que un error pequeño en las condiciones iniciales implique únicamente un pequeño error en la predicción. Como se verá más adelante, esta propiedad es válida para sistemas lineales en los que, por definición, se tiene que el efecto es proporcional a la causa. Sin embargo, los sistemas reales casi siempre son no lineales y pequeños cambios sí pueden producir enormes cambios en las salidas exhibidas por estos sistemas.

Por lo tanto, de acuerdo a Lubinski (1998), aquel requisito del determinismo de conocer con exactitud infinita las condiciones iniciales de un sistema es, en efecto, un imposible: disponer de una información infinita – un ideal – proporcionaría una trayectoria única para el sistema no dejando cabida al azar, mientras que disponer de una información “tan grande como se quiera” - la situación real – proporciona una familia de trayectorias para el sistema, lo que deja espacio al azar o, en los términos adoptados para este trabajo, a incertidumbres externas, exógenas o aleatorias.

A continuación, procedemos a explorar detalladamente algunos aspectos de esta revolución científica que empezó en el siglo XX, que consideramos pertinentes para la elaboración de un marco teórico que permita la incorporación del concepto de incertidumbre en la EIA.

1.4 La complejidad como paradigma científico

Pese a todos los éxitos científicos y tecnológicos que se realizaron aplicando el paradigma científico mecanicista, desde finales del siglo XIX empezaron a evidenciarse algunas de las limitaciones que tiene este enfoque al momento de abordar algunos fenómenos que suceden en el universo. Estos primeros descubrimientos científicos que indicaron dichas limitaciones fueron las primeras semillas para lo que, eventualmente, se

convertiría en el inicio de la configuración de un nuevo paradigma científico, uno que se ha denominado “la complejidad”.

Por supuesto, llegar desde el punto en el que se consideraba al mecanicismo como una herramienta que le daba al ser humano un control absoluto para el entendimiento y predicción de fenómenos de toda índole, hasta aquel en el que se aceptan sus bondades pero también sus limitaciones, no es un proceso que se haya dado en cuestión de unos pocos años. De hecho, podríamos argumentar que aún estamos inmersos en dicho cambio de mentalidad.

Con el fin de generar un contexto histórico y de plantear algunas de las disertaciones a las que se vieron enfrentados los científicos de la época y que han conllevado cambios científicos tan trascendentales como los que expondremos en las secciones posteriores, a continuación analizamos algunos de los primeros descubrimientos científicos que fueron evidencia de limitaciones del mecanicismo, particularmente aquellas relacionadas con su poder predictivo.

El problema de los tres cuerpos

Iniciamos este análisis con un problema que cumplía todos los criterios para que los físicos y matemáticos de los siglos XVII, XVIII y XIX lo clasificaran como un problema “típico” para la mecánica clásica. “El problema de los tres cuerpos”, como se le ha conocido históricamente, capturó la atención de los científicos de entonces por 2 características esenciales; por un lado, su relación con el estudio científico de la estabilidad del sistema solar y, por otro, la falta de correspondencia entre la sencillez de su planteamiento y el nivel de dificultad que implica su solución. Barrow-Green (1996, p. 7) lo enuncia como sigue: “tres partículas se mueven en el espacio bajo su atracción gravitacional mutua - el sol, la tierra y la luna -; dadas sus condiciones iniciales, determine su movimiento subsecuente”¹⁴ [Traducción propia].

A pesar de que solo hasta inicios del siglo XX fue posible obtener una solución teórica - pero sin valor práctico -¹⁵, el estudio del problema se remonta al siglo XVII

¹⁴ En principio, este enunciado pareciera hacer alusión a un problema matemáticamente sencillo que involucra la solución de un sistema de ecuaciones diferenciales planteado para estas tres variables. En caso de que el lector desee conocer el planteamiento matemático detallado del problema y su correspondiente desarrollo, le recomendamos consultar la obra de Barrow-Green (1996).

¹⁵ A inicios del siglo XX, el matemático y astrónomo finlandés Karl Sundman "resolvió" matemáticamente el problema suministrando una solución mediante una serie de potencias convergente válida para todos los valores de tiempo. Sin embargo, la tasa de convergencia de la serie propuesta por Sundman como solución es tan lenta que no brinda información cualitativa acerca del comportamiento del sistema, por lo que no es de uso práctico y deja muchos interrogantes sin resolver (Barrow-Green, 1996). Posteriormente, con la ayuda

con la introducción de la teoría de gravitación universal por parte de Isaac Newton¹⁶. Desde la publicación de su obra *Principia* en 1687, se volvió importante verificar si la ley de gravitación universal por sí sola era capaz de entregar un entendimiento completo de la forma como los cuerpos celestes se mueven en el espacio; esta verificación estaba planteada mediante la comparación de los resultados de su desarrollo teórico con la observación del movimiento de los cuerpos en el espacio (Barrow-Green, 1996).

Entre 1750 y los inicios del siglo XX, se publicaron más de 800 papers relacionados con el problema, incluyendo el trabajo de reconocidos astrónomos y matemáticos como el matemático suizo Johann Bernoulli, el matemático holandés-suizo Daniel Bernoulli, el matemático y astrónomo francés Alexis Claude Clairaut, el matemático y físico suizo Leonhard Euler y el mismo Isaac Newton quien, abrumado por las dificultades que le imponían los cálculos que debía hacer para solucionar el problema, le comentó al astrónomo John Machin que "... su cabeza nunca le había dolido como con los estudios que hizo de la luna" [Traducción propia] (Barrow-Green, 1996, p. 15).

Gracias a estos trabajos, surgieron varias propuestas de solución para el problema; sin embargo, todas se basaban en simplificarlo de alguna manera y, por tanto, hacer aproximaciones, ya que resultaba imposible hallar una función analítica - el tipo de respuesta que los matemáticos de la época esperaban encontrar como solución al sistema de ecuaciones diferenciales - como solución (Barrow-Green, 1996).

Tal era la dificultad para solucionar el problema (¡un aparentemente "simple" conjunto de 3 ecuaciones diferenciales!) que el matemático inglés Edmund Taylor Whittaker (1937, p. 339 citado en Barrow-Green, 1996) llegó a calificarlo como "el más célebre de todos los problemas dinámicos"; por su parte, el matemático alemán David Hilbert lo incluyó dentro de su célebre lista de "buenos" problemas matemáticos" (Barrow-Green, 1996).

A finales del siglo XIX, el matemático y físico francés Henri Poincaré demostró, a partir del trabajo realizado por el astrónomo y matemático alemán Ernst Bruns, que, a diferencia de lo que sucede con los problemas análogos de uno y dos cuerpos, para el problema de tres cuerpos no existe una solución analítica dada por expresiones algebraicas e integrales (O'Connor & Robertson, 2006).

de los computadores fue posible hallar una solución aproximada al problema aplicando métodos de integración numérica.

¹⁶ Aunque las leyes de Kepler son suficientes para describir el movimiento de los planetas alrededor del sol, incluso los hechos más obvios acerca del movimiento lunar no pueden entenderse sin tener en cuenta la atracción gravitacional tanto de la tierra como la del sol (Gutzwiller, 1998).

Con este trabajo teórico - que le permitió a Poincaré ganar la competencia internacional establecida por Oscar II, rey de Suecia y Noruega, con el objetivo de buscarle solución al problema - y el desarrollo matemático posterior, Poincaré marcó un hito en el estudio y desarrollo de la mecánica y la dinámica celeste, hasta llegar a ser reconocido actualmente por atribuírsele la primera descripción matemática de lo que más adelante se conocería como el comportamiento caótico de un sistema dinámico. Este trabajo representó un cambio significativo en la forma como se abordaba el estudio de la dinámica de cuerpos; un cambio que, eventualmente, resultó en la configuración de la teoría moderna de sistemas dinámicos (Barrow-Green, 1996).

Gracias a los aportes de Poincaré, los físicos del siglo XX, al igual que los matemáticos, ingenieros y los astrónomos, han dado un giro epistemológico alejándose de los primeros practicantes de la mecánica clásica al aceptar una realidad que estos últimos desconocieron: incluso cuando se trata con sistemas dinámicos "simples" - con solo dos grados de libertad y en los que se conserva la energía -, tales como un péndulo doble, los comportamientos complicados son la regla en lugar de ser la excepción (Gutzwiller, 1998).

Los inicios de la mecánica cuántica

Los primeros indicios de la forma en que se comporta el mundo de las partículas subatómicas llegaron a principios en el siglo XX de la mano del físico alemán Max Planck, a quien lo inquietaba conocer la razón por la que los cuerpos cambian de color al calentarse. En un principio, Planck quedó completamente desconcertado al descubrir que la respuesta teórica que obtenía cuando aplicaba las leyes de la mecánica clásica no concordaba con sus observaciones. Propuso entonces un conjunto de hipótesis que permitían explicar el fenómeno pero que, hasta para él, eran difíciles de creer (Matlock & Taylor, 2009).

Fue el físico alemán Albert Einstein quien, a partir del trabajo desarrollado por Planck, inició el desarrollo de la mecánica cuántica. Posteriormente, le siguieron los avances realizados por el físico danés Niels Bohr relacionados con el comportamiento de los átomos, la dualidad onda-partícula demostrada por el físico francés Luis de Broglie y la formalización de la teoría de la mecánica cuántica hecha por el físico austriaco Erwin Schrödinger (Matlock & Taylor, 2009).

Uno de los planteamientos fundamentales sobre los que reposa esta teoría es el hecho de que al “observar”¹⁷ un fenómeno cuántico su comportamiento cambia (Matlock & Taylor, 2009). Las implicaciones de este planteamiento se evidencian en lo que el físico alemán Werner Heisenberg denominó “el principio de incertidumbre”, introducido en 1927. Este principio sostiene que, gracias al comportamiento que adoptan las partículas subatómicas cuando las “observamos”, nos es imposible medir la posición y la cantidad de movimiento – 2 cantidades físicas – de una partícula subatómica simultáneamente y con una precisión infinita (Serway & Jewett, 2005).

Las implicaciones de este planteamiento para los anhelos predictivos de la física clásica, al menos a una escala subatómica, son evidentes. Recordando las palabras de Laplace, resultaría imposible determinar y, por ende, predecir la trayectoria de una partícula sin conocer con precisión su posición y velocidad.

La mecánica estadística y la teoría de la probabilidad

A finales del siglo XIX y principalmente en la primera parte del siglo XX, los científicos identificaron otro problema que limitaba, al menos para la época, el poder predictivo de la mecánica clásica. Se trataba de la capacidad limitada de cálculo de la que disponían en la época para aplicar los métodos ya establecidos a situaciones en las que intervenían un gran número de variables. Weaver (1948) ilustra este punto mediante un ejemplo sencillo que se expone brevemente a continuación:

Un problema típico para la física del siglo XIX consistía en determinar las trayectorias de algunas bolas de billar - 2 o 3 - en una mesa de juego. Sin embargo, al incrementar el número de bolas más allá de una decena, la tarea de determinar el curso individual de cada bola resultaba imposible en la práctica para la mecánica clásica convencional, debido al limitado poder de cálculo de la época.

Los científicos evidenciaron la necesidad de adoptar un nuevo enfoque para tratar con este tipo de problemas. La propuesta consistía en realizar abstracciones del fenómeno como un todo sin descomponerlo, en lugar de concentrarse en sus partes constituyentes (Weaver, 1948). En otras palabras, se buscaba concentrarse en responder preguntas relacionadas con todo el conjunto de bolas de billar bajo estudio y no con las trayectorias individuales de cada una.

¹⁷ Por “observar” los físicos se refieren a someter los objetos cuánticos a ciertas condiciones que los hacen interactuar con el entorno, por ejemplo iluminarlo con luz para poder observar y medir los fenómenos (Matlock & Taylor, 2009).

De los emprendimientos científicos que buscaban encontrar formas de tratar con este tipo de problemas surgieron herramientas como las de la Teoría de la Probabilidad y las de la Mecánica Estadística que, concentrándose en el fenómeno bajo estudio como un todo sin descomponerlo, ofrecieron respuestas útiles a preguntas como ¿en promedio, cuántas bolas por segundo golpean una banda?, ¿en promedio, qué tanto se alcanza a mover una bola antes de que sea golpeada por otra bola? o ¿en promedio, cuántos golpes por segundo recibe una bola? (Weaver, 1948).

A aquellos problemas que ameritaban un abordaje semejante, Weaver (1948) les denominó problemas de “complejidad desorganizada”. Algunos ejemplos de fenómenos que hacen parte de esta categoría son el movimiento de los átomos que conforman la materia, el movimiento de las estrellas que conforman el universo o los fenómenos termodinámicos.

Con el análisis de estos avances científicos no queremos justificar lo inadecuado del enfoque mecanicista para el modelamiento y análisis de ciertos fenómenos, particularmente aquellos de interés en el desarrollo de una EIA. Esto sería equivocado. Mientras que es bien sabido que la teoría de la mecánica cuántica aplica principalmente¹⁸ a una escala subatómica que no es de interés en el desarrollo de una EIA, las limitaciones teóricas y prácticas señaladas por el problema de los tres cuerpos y por los problemas de complejidad organizada han sido superadas ampliamente gracias al gran poder de cálculo que ha estado disponible en las últimas décadas.

Por el contrario, queremos señalar estos avances científicos como ingredientes esenciales para el cambio paulatino que ha sufrido el pensamiento científico en el último siglo, superando aquella concepción omnipotente que en algún momento se llegó a tener de la capacidad explicativa y predictiva del mecanicismo.

Con el terreno ya abonado, en las primeras décadas del siglo XX algunos científicos concentraron su atención en algunos problemas que, una vez más, resultaba imposible explicar mediante las herramientas de la mecánica clásica y a los que tampoco eran aplicables las técnicas de la mecánica estadística o la teoría de la probabilidad (Weaver, 1948; Anderson & Doyle, 2010). Estos problemas, a los que Weaver (1948) denominó de “complejidad ordenada”, se caracterizaban por involucrar un gran número de variables - aunque no tantas como los fenómenos analizados mediante la Mecánica Estadística -

¹⁸ En el año 2010, la reconocida revista Science y la Asociación Estadounidense para el Avance de la Ciencia (AAAS, por sus siglas en inglés) seleccionaron como “avance notable” del año, el experimento realizado por el estudiante de doctorado en física de la Universidad de California, Aaron O'Connell, quién logró inducir y medir los efectos cuánticos, bajo ciertas condiciones específicas, en el movimiento de un objeto fabricado a escala humana (Pain, 2010).

que exhibían cierto tipo de organización. Esta idea, esencialmente novedosa para la época, ha sido la piedra angular para la configuración de un nuevo paradigma científico.

Checkland (1993) analizó en su trabajo algunos ejemplos que permiten comprender mejor este planteamiento. A continuación reseñamos brevemente dos de estos ejemplos.

A principios del siglo XX, el filósofo y biólogo prusiano Hans Adolf Eduard Driesch realizó experimentos con embriones de tritón (un tipo de anfibio) que le permitieron llegar a conclusiones inquietantes para la época: si la futura cola de un embrión de tritón se removía y se insertaba en una posición donde normalmente crecería una pierna, la que se suponía que era una cola, en esta nueva posición, ¡crecía como una pierna! (Checkland, 1993).

Posteriormente, en la década de 1920, los experimentos demostraron que en un estadio posterior de desarrollo las partes de un embrión estaban aparentemente comprometidas con su curso de desarrollo. El tejido joven del muñón de una cola de tritón amputada se convertía en una pierna si se injertaba en una posición de pierna, pero el tejido más maduro crecía en forma de cola donde fuese insertado (Köester, 1945 citado en Checkland, 1993).

¿Cómo "sabía" el tejido de cola que después de cierto punto ya no podría crecer en otra cosa que no fuera una cola y cómo podría "persuadir" al tejido anfitrión para que se comportara adecuadamente? (Checkland, 1993, p. 82). En este caso, el sentido de organización reside en el mecanismo de comunicación existente entre los tejidos para, de alguna forma, definir su desarrollo de forma conjunta.

Por otro lado, en el campo de las ciencias sociales las limitaciones del enfoque mecanicista que se empezaron a evidenciar estaban relacionadas con el hecho de que el objeto de estudio en este campo del conocimiento, los seres humanos, participan activamente en los fenómenos estudiados, atribuyendo significados y modificando las situaciones en una forma potencialmente única (Checkland, 1993). Gracias a esta participación activa de los seres humanos en los fenómenos en los que se ven involucrados, realizar una abstracción aislando a un ser humano de su contexto social - la propuesta mecanicista - y, por tanto, desconociendo el sentido de organización presente, no sería una representación adecuada de la realidad.

Esta característica - agentes que se interrelacionan conformando un "todo" que exhibe cierto tipo de organización - hace que sea necesario un planteamiento radicalmente diferente al del mecanicismo de la ciencia clásica, ya que no es posible comprender esta organización aplicando el supuesto mecanicista según el cual la división que debe realizarse para analizar determinado problema - el principio más central de la práctica científica mecanicista - no distorsiona el fenómeno que se estudia (Checkland, 1993).

Fue en la década de 1980 cuando estas ideas fueron condensadas bajo el concepto de “teoría de la complejidad”; concepto que emergió a partir de un centro de pensamiento conocido como el Instituto Santa Fe en donde confluyeron académicos, ideas e investigaciones científicas de campos, aparentemente dispares, como la física, la ecología, la economía, la política, la teoría del caos, y la inteligencia artificial, entre otros (Waldrop, 1993; Smitherman, 2004).

Entre las investigaciones científicas que permearon este centro de pensamiento se pueden encontrar el trabajo *General System Theory* publicado en 1958 por el biólogo austriaco Karl Ludwig von Bertalanffy, la obra del premio nobel de química Ilya Prigogine, *Order out of chaos*, y el trabajo sobre estructuras autopoiéticas de los biólogos chilenos Humberto Maturana y Francisco Varela, entre otros (Waldrop, 1993; Smitherman, 2004).

Actualmente, la complejidad se relaciona con el estudio de fenómenos que emergen de una colección de objetos que interactúan¹⁹ (Johnson, 2007). Algunos ejemplos de este tipo de fenómenos son enunciados a manera de preguntas por Weaver (1948) y Waldrop (1993) [Traducción propia]:

¿Cómo se convirtió la sopa primitiva de aminoácidos y otras moléculas simples en la primera célula viviente hace unos 4 billones de años? ¿Fue un milagro que surgió del azar o había algo más que aún no entendemos ocurriendo en esa sopa primitiva?

¿Qué hace que una onagra (flor que se abre en las tardes) florezca cuando lo hace?

¿Qué es la mente? ¿Cómo es que 3 libras de materia, el cerebro, dan lugar a cualidades inefables como los sentimientos, el pensamiento, los propósitos o la conciencia?

¿Por qué una familia rural en un país como Bangladesh aun en la actualidad²⁰ da origen a un promedio de siete niños, incluso cuando el control prenatal está disponible de manera gratuita y cuando los aldeanos parecen ser conscientes de la forma en que los lastima la gran

¹⁹ Vale la pena resaltar que, como lo reconoce Johnson (2007), aun hoy en día no hay un consenso científico acerca de lo que es la complejidad, razón por la cual es usual encontrar cierto sentido de tautología al tratar de buscar una definición de su objeto de estudio. Esto es evidencia de que la configuración de este planteamiento científico es un proceso que aún está en sus primeras etapas de desarrollo, lo que permite al lector comprender las discrepancias conceptuales que puedan presentarse entre este y otros trabajos relacionados.

²⁰ El autor se refiere a la década de los 90.

sobrepoblación del país y su estancado desarrollo?, ¿Por qué continúan en un curso de acción tan evidentemente dañino?

¿Cómo se puede explicar el comportamiento de un grupo organizado de personas como una unión sindical, un grupo de manufactureros o una minoría radical?

Ha sido tal la trascendencia que ha tenido para la ciencia concentrar su atención en este tipo de fenómenos, que ha llegado a calificarse a la complejidad como “la revolución que está cambiando el enfoque de la investigación en todas las disciplinas científicas” [Traducción propia] (Baranger, 2000, p. 1). Esta es precisamente la razón por la que en este trabajo nos referimos a la complejidad como un nuevo paradigma científico.

Pese a esto, es importante tener en cuenta el papel que este nuevo paradigma juega en el escenario científico. Lejos de querer menospreciar los avances que se puedan lograr aplicando el enfoque mecanicista, buscamos formas científicamente válidas para complementar y mejorar las herramientas, los modelos y los métodos existentes, particularmente aquellos usados para realizar una EIA. Precisamente, esta fue la idea con la que se empezó a configurar la complejidad al interior del Instituto Santa Fe; la de ser la primera alternativa rigurosa al pensamiento lineal y reduccionista característico de la ciencia clásica (Walldrop, 1993).

De esta forma, la complejidad se convierte “únicamente” en una forma adicional y complementaria a las ya existentes para seguir infiriendo modelos a partir de la observación y el estudio de las regularidades que existen en el universo, lo que, en últimas, es lo que ha tratado de hacer la ciencia desde siempre (Ljung, 1987; Phelan, 2001).

Hasta el momento, la contextualización histórica previa permite al lector comprender las razones que llevaron a los planteamientos esenciales a partir de los cuales se ha empezado a configurar la teoría de la complejidad; sin embargo, no permite concluir la pertinencia de aplicar sus planteamientos al desarrollo de una EIA. Con los objetivos de fortalecer este planteamiento y de evitar la utilización inadecuada de términos como “complejidad”, “sistema complejo” o “caos” - algo a lo que Phelan (2001) denomina “pensamiento por similitudes” -, a continuación procedemos a realizar un análisis más profundo de algunos de los campos del conocimiento que se han desarrollado bajo la gran sombrilla de la teoría de la complejidad y que consideramos pueden aportar importantes lecciones para el mejoramiento de la EIA como proceso de toma de decisiones; se trata del estudio de los Sistemas Complejos, el análisis de Comportamientos Caóticos y una revisión de los desarrollos en torno al manejo de Información Imperfecta.

1.4.1 Sistemas complejos

La teoría de la complejidad suele asociarse, entre otros aspectos, con el estudio de un tipo particular de sistemas denominados “complejos”. Gracias al desarrollo científico que se ha dado en este campo a partir de hitos como la obra *General System Theory* publicada en 1968 por el biólogo y filósofo austriaco Karl Ludwig von Bertalanffy²¹, actualmente suelen agruparse en esta categoría algunos sistemas que satisfacen ciertas características especiales.

Tal y como comentamos que sucede con la teoría de la complejidad, el campo de los sistemas complejos es tan reciente que podemos argumentar que, aun hoy en día, muchos de sus conceptos y herramientas se encuentran en sus primeras etapas de construcción. Resultado de ello es que aún en la actualidad se esté lejos de un consenso científico alrededor de conceptos fundamentales como lo es la definición de sistema complejo. Pese a esto, varios autores coinciden en señalar algunas características esenciales que los sistemas deben exhibir para ser considerados complejos. A continuación las reseñamos.

En general, se acepta que el concepto de sistema complejo hace referencia a un conjunto de objetos, elementos o agentes interdependientes²², gracias a que se encuentran físicamente cerca o a que comparten algún tipo de información, que, a su vez, son interdependientes con elementos que se encuentran “fuera” del sistema²³. Necesariamente, esto impone el reto de definir límites para el sistema - i. e. ¿qué hace parte del sistema y qué no? -; el reto radica en que muchas de las interacciones que existen entre objetos o agentes de un sistema complejo no nos son fácilmente identificables. Atendiendo a esta dificultad, Bertalanffy (1968) planteó el concepto de “sistema abierto”, haciendo referencia a que no por el hecho de que un elemento quede por fuera de las fronteras que arbitrariamente definamos para un sistema, significa que el elemento no va a interactuar con aquellos que, de acuerdo a nuestro criterio, sí hacen

²¹ Vale la pena recordar la consideración realizada previamente relacionada con el tipo de sistemas de los que habla Bertalanffy en su obra. Si bien él no habla explícitamente de “sistemas complejos”, consideramos que, teniendo en cuenta la evolución de las investigaciones científicas en este campo, esta es la denominación pertinente para asociar los diferentes trabajos que han surgido a partir de los planteamientos básicos que Bertalanffy reunió en su trabajo *General System Theory*. En adelante, usaremos indistintamente las denominaciones “sistema” y “sistema complejo” sin desconocer que existen sistemas no complejos.

²² Bar-Yam (1997) insta a usar el término “interdependientes” en lugar de “interconectados” debido a que este último no denota la influencia directa que los elementos de un sistema complejo tienen entre sí.

²³ Algunos enfoques para estudiar los sistemas complejos, como la dinámica de sistemas expuesta por Meadows (2009), ofrecen definiciones más particulares que, sin embargo, también acogen estos postulados básicos.

parte de él. De esta forma, se acepta que los sistemas complejos son sistemas abiertos que están en constante interacción con su entorno, por medio de un intercambio de materia, energía e información que fluye desde y hacia el sistema complejo (Bertalanffy, 1968; Checkland, 1993; Walldrop, 1993; Farber, 2003; Johnson, 2007; Cho, 2009).

Baranger (2000) resalta mediante un ejemplo el hecho de que el comportamiento que exhibe un sistema complejo depende en gran medida de las conexiones que existen entre los diferentes componentes o agentes del sistema (p. 9):

“Primero, considere un sistema no complejo con muchos constituyentes: un gas en un contenedor. Remueva el 10% de sus constituyentes; es decir, sus moléculas... ¿qué pasa? No mucho. La presión cambia un poco, o el volumen, o la temperatura, pero, en últimas, el gas que queda se comporta de igual manera que el gas original. Ahora realice el mismo experimento con un sistema complejo: el cuerpo humano. Remueva el 10% de sus constituyentes - una extremidad, por ejemplo -... ¿qué pasa? El resultado es bastante más espectacular que en el caso del gas.” [Traducción propia]

El listado de características que, de acuerdo a la mayoría de autores consultados, debe satisfacer un sistema para poder considerarse complejo no termina con las enunciadas hasta el momento; sin embargo, debido a que consideramos que las características que aún tenemos pendientes por mencionar merecen una revisión más detallada, las hemos separado y procedemos a reseñarlas a continuación. Vale la pena resaltar que, debido a la inexistencia de un consenso científico, este listado no corresponde a una lista taxativa que deba usarse para clasificar en dos conjuntos con fronteras definidas de manera precisa qué sistemas son complejos y cuáles no.

Comportamientos dinámicos no lineales

Gracias a la interacción que existe entre sus componentes, los sistemas complejos se caracterizan por exhibir comportamientos dinámicos y no lineales²⁴ (Bertalanffy, 1968; Checkland, 1993; Walldrop, 1993; Farber, 2003; Johnson, 2007; Meadows, 2009; Cho, 2009). En relación al dinamismo que caracteriza a los sistemas

²⁴ Contrario a lo que sucede con los sistemas complejos, Davies (1987, citado en You, 1993) afirma que el estudio de un sistema no complejo lineal se caracteriza por dos suposiciones importantes: 1) causalidad lineal, refiriéndose a que un cambio en la entrada del sistema conlleva a un cambio lineal proporcional de su salida; y 2) el sistema puede descomponerse en partes - reducirlo -, pudiendo obtener modelos del comportamiento global del sistema agregando los modelos correspondientes a las partes desagregadas. El hecho de que estas dos suposiciones no se cumplan al tratar con sistemas complejos, tiene implicaciones muy importantes a la hora de tratar de realizar predicciones sobre su comportamiento, haciendo imposible aplicar el mismo razonamiento que aplicamos al tratar con sistemas no complejos.

complejos, aunque esta característica suele definirse únicamente como un cambio del comportamiento del sistema en función del tiempo, cuando se habla de sistemas complejos es importante tener en cuenta que este cambio en el comportamiento - la salida del sistema - depende tanto del estado actual del sistema como también de su estado pasado.

Este fenómeno, que permite hablar de sistemas con memoria, es posible gracias a la existencia de mecanismos de realimentación²⁵ (Johnson, 2007; Meadows, 2009). A pesar de no conocerlos con esta denominación, estamos más familiarizados de lo que creemos con este tipo de mecanismos; considere el siguiente ejemplo a modo de ilustración. Cuando debemos escoger una ruta para movilizarnos de un punto a otro dentro de una ciudad con alto tráfico vehicular, es usual que utilicemos como criterios para la toma de la decisión tanto el estado actual del sistema, representado por los reportes de tráfico disponibles a través de plataformas tecnológicas, como su estado pasado, al recordar experiencias previas - he ahí el mecanismo de realimentación - propias o de otras personas que puedan entregarnos insumos valiosos para la toma de la decisión - por ejemplo, estado de la infraestructura vial, situación de seguridad, entre otros.

Por otro lado, la no linealidad de estos sistemas significa que no se les puede modelar mediante relaciones matemáticas de proporcionalidad²⁶. Un ejemplo típico de un sistema cuyo comportamiento es lineal - dentro de su rango normal de operación y con una apropiada calibración - es el sistema de aceleración de un automóvil: conforme más presión ejerzamos sobre el pedal de aceleración, más velocidad ganará el automóvil en una proporción igual a aquella fuerza que ejerzamos sobre el pedal. Por el contrario, un ejemplo de no linealidad es el aparentemente simple modelo matemático de la denominada función logística, usada muy a menudo en biología para describir la variación del número de individuos de determinada especie; este modelo muestra que el número de individuos en determinado momento del tiempo está descrito por una función de tipo exponencial no lineal (May, 1976).

²⁵ Estos mecanismos de realimentación son la forma mediante la cual un sistema puede ajustar elementos de su estructura, con el objetivo de modificar la salida o el comportamiento que está exhibiendo. Un ejemplo típico de un mecanismo de realimentación es el termostato presente en un sistema de calefacción - un sistema no complejo -: el termostato reacciona permitiendo calentar o enfriar una habitación en función de la diferencia entre la temperatura de la habitación y la temperatura que el usuario desee. Por supuesto, los sistemas complejos establecen mecanismos de realimentación bastante más sofisticados.

²⁶ Dadas dos variables x y y , se dice que y es proporcional a x si existe una constante k diferente de 0 tal que se cumpla la siguiente relación matemática: $y=kx$

Auto-organización

Este es el nombre que varios autores coinciden en darle a la capacidad o habilidad con la que cuentan los objetos o agentes que componen un sistema complejo para dotarlo de cierto tipo de organización (King, 1989; Baranger, 2000; Walldrop, 1993; Smitherman, 2004; Johnson, 2007; Meadows, 2009; Cho, 2009). Johnson (2007) resalta que este proceso de auto-organización sucede sin que sean necesarias las labores de coordinación de un controlador central; por el contrario, según explica, el proceso depende de la estructura que en determinado momento tenga el sistema y de los estímulos que reciba de su entorno.

Walldrop (1993) resalta como ejemplos de esta característica la forma en que se organizan los genes en un embrión en desarrollo de una forma para constituir la célula de un hígado y de otra para constituir la célula de un músculo, los organismos que constantemente se adaptan entre sí a través de la evolución para dar origen a ecosistemas “exquisitamente sintonizados” y las personas que se organizan para satisfacer sus necesidades materiales, a través de un sinnúmero de acciones de compra y venta.

Meadows (2009) señala que, gracias a lo impredecible - y, por ende, incómodo - que nos resulta un comportamiento de este tipo, es usual que busquemos limitar esta característica en los sistemas complejos, en busca de características que encontremos más atractivas como la productividad o la estabilidad; tal es el caso de los procesos de formación laboral, que tienen como objetivo la formación de operadores mecánicos en contraposición a seres humanos creativos, o las técnicas de manipulación genética de organismos, que limitan la variabilidad genética de los cultivos.

Jerarquías

Uno de los planteamientos fundamentales de los sistemas complejos es que, en teoría, todo está conectado con todo; por fortuna, en la práctica las relaciones que existen entre diferentes componentes tienen diferente intensidad. Este descubrimiento llevó a plantear el modelo según el cual los sistemas complejos están organizados en jerarquías o niveles; en otras palabras, cualquier sistema complejo que se escoja será un subsistema de un sistema más “grande” y, a su vez, estará compuesto de subsistemas más “pequeños”. De esta forma, las relaciones más intensas se darán entre aquellos componentes que se encuentren en la misma jerarquía o nivel (King, 1989; Checkland, 1993; Baranger, 2000; Smitherman, 2004; Meadows, 2009; Cho, 2009).

Un ejemplo típico que permite ilustrar este punto es la secuencia de subsistemas y sistemas reseñada a continuación (King, 1989; Meadows, 2009):

Figura 3: Ejemplo de jerarquía de sistemas complejos

...⇒ célula ⇒ órgano ⇒ organismo ⇒ población ⇒ comunidad ⇒...

Fuente: Elaboración propia

Baranger (2000) expone un ejemplo que resalta la importancia de algunas interconexiones (sí, todo está conectado con todo pero es imposible que en la práctica hagamos abstracciones de todo), dependiendo del nivel que se quiera analizar (p.9):

Nivel 0: cuerpo humano

Nivel 1: cabeza, tronco, extremidades...

Nivel 2: huesos, músculos, estómago, sangre, nervios...

Nivel 3: células, núcleos, mitocondrias, citoplasma...

Nivel 4: cromosomas que contienen ADN, moléculas de proteína especializadas...

Propiedades emergentes

Gracias a la auto-organización que exhiben los sistemas complejos, este tipo de sistemas también se caracteriza por presentar comportamientos denominados “emergentes”, en el sentido de que son comportamientos que se generan a partir de la interacción de componentes en determinado nivel de un sistema complejo, pero que no pueden predecirse - al menos no con los modelos disponibles actualmente - considerando únicamente las propiedades de los componentes cuya interacción da origen a la propiedad en cuestión (King, 1989; Baranger, 2000; Walldrop, 1993; Smitherman, 2004; Johnson, 2007; Cho, 2009). La existencia de estas propiedades implica nuestra imposibilidad de predecir el comportamiento emergente de un sistema complejo analizando únicamente sus partes; es decir, como hemos aprendido a hacer mediante el enfoque reduccionista del mecanicismo.

Precisamente, este es el caso de la acción de caminar que realizamos los seres humanos. Esta acción - nivel n - no puede comprenderse ni predecirse únicamente estudiando por separado los componentes del nivel más bajo - nivel $(n-1)$ -: la cabeza, el tronco o las piernas; es necesario considerar las interacciones existentes entre estos subsistemas y que dan lugar al comportamiento emergente del sistema complejo que es el cuerpo humano (Baranger, 2000).

Otro ejemplo, esta vez extraído de la ecología, señala que, cuando ciertas algas y celenterados - nivel $(n-1)$ - evolucionan juntos para dar lugar a un coral - nivel n -, se produce un mecanismo eficaz para el reciclado de nutrientes que permite que ese sistema combinado mantenga una elevada tasa de productividad en aguas con un contenido de nutrientes muy bajo (Odum & Barret, 2006).

Es gracias a esta característica que los sistemas complejos muy a menudo se asocian casi a manera de slogan con la famosa frase “el todo es más que la suma de las partes”, que aparece en trabajos como el de Bertalanffy (1968) y el de Cho (2009).

A propósito de la existencia de estas propiedades emergentes y del objetivo que nos ocupa en este trabajo de investigación - incorporar el concepto de incertidumbre en la EIA -, vale la pena rescatar una cita del famoso físico teórico Fritjof Capra (1982) que resalta varios aspectos relacionados con la predicción de los comportamientos emergentes de los sistemas complejos (p. 285):

“Los organismos vivos tienen la habilidad innata de trascender a sí mismos para crear nuevas estructuras y nuevos patrones de comportamiento. Esta forma creativa de trascender hacia la novedad, lo que con el tiempo conduce a un despliegue organizado de complejidad, se puede considerar como una propiedad fundamental de la vida.” [Traducción propia]

Resiliencia

Una última característica alrededor de la cual hay un consenso entre la mayoría de los autores consultados, es la habilidad de los sistemas complejos para responder de manera activa a su entorno - con el que también está conectado (Walldrop, 1993; Checkland, 1993; You, 1993; Smitherman, 2004; Johnson, 2007; Meadows, 2009).

Toro, Duarte, Requena y Zamorano (2012) señalan que el concepto de resiliencia surgió de la ecología y que se asocia con la capacidad de un sistema para absorber perturbaciones que reciba de su entorno y reorganizarse, buscando mantener la misma función, estructura, identidad y mecanismos de realimentación. Estos mecanismos son el insumo esencial por medio del cual los componentes o agentes de un sistema complejo pueden responder de manera activa a las perturbaciones que reciban de su entorno (Johnson, 2007).

Meadows (2009) advierte que los sistemas complejos sólo gozan de esta habilidad para responder activamente a las perturbaciones de su entorno dentro de ciertos rangos (p. 78):

“Muchas enfermedades crónicas, como el cáncer y otras relacionadas con el corazón, son el resultado de la ruptura de los mecanismos de resiliencia que reparan el ADN, que mantienen flexibles los vasos sanguíneos o que controlan la división celular. Los desastres ecológicos en muchas partes son el resultado de la pérdida de resiliencia, que resulta de la remoción de especies que habitan los ecosistemas, de la alteración de las características químicas y biológicas del suelo, o de la acumulación de toxinas.” [Traducción propia]

Si bien estas son las características alrededor de las cuales hay un consenso entre la mayoría de autores consultados²⁷, existe un aspecto adicional que consideramos relevantes para el tipo de sistemas que abordamos en este trabajo - aquellos que componen el sistema ambiente.

Johnson (2007) plantea que existe un factor esencial que permite explicar el porqué de la existencia de los sistemas complejos. Según su planteamiento, el que estos sistemas sean en efecto complejos se debe a que los distintos agentes que componen el sistema compiten por un recurso que es escaso: el espacio en una carretera por el que compiten los conductores, alimento por el que compiten individuos de una especie o el precio de una acción en una bolsa de valores por el que compiten los corredores de bolsa. En este sentido, advierte que de no existir esta limitante, los agentes lograrían el objetivo que deseen sin importar la forma en que se comporten.

Asimismo, Meadows (2009) resalta la importancia de reconocer - e incorporar en el análisis de sistemas complejos - la estrecha relación que tienen los agentes de un sistema complejo con las fuentes de un determinado recurso y los sumideros de las salidas que genera el sistema. A tales fuentes y sumideros les denomina *stocks* del sistema. A manera de ejemplo, analiza el modelo energético mundial que aún en la actualidad se encuentra basado ampliamente en la extracción de petróleo; en esta situación, los *stocks* del sistema son, por un lado, los pozos de petróleo existentes y, por el otro, aquellos sumideros que reciben los sub-productos en los que transformamos esta energía fósil - por ejemplo, la atmósfera que recibe las emisiones de dióxido de carbono. Meadows (2009) resalta el hecho de que los seres humanos pareciéramos fijarnos más en los *stocks* de un sistema que en los flujos - tasas de consumo y desecho - que existen entre estos *stocks* y los agentes del sistema. Según explica, esta es la razón por la que

²⁷ Baranger (2000) señala que para que los sistemas complejos se mantengan complejos necesitan exhibir un comportamiento un tanto paradójico: interacción entre cooperación y competencia. Señala que lo usual es que la cooperación se dé a una escala, nivel o jerarquía más fina de aquella en la que se da la competencia; como ejemplo, expone la guerra entre naciones - competencia en el nivel *n* - que se contrapone al patriotismo subyacente que las soporta - cooperación en el nivel *n-1*.

nos enfocamos en mantener el comportamiento del sistema económico buscando nuevos pozos petroleros - el stock - y descartamos otras estrategias como la reducción del consumo de petróleo - el flujo.

Como mencionamos previamente, este trabajo de investigación parte de asumir que entender la naturaleza de los sistemas complejos permite proponer mejoras para el proceso de modelamiento de los fenómenos ambientales que se analizan en el marco de una EIA de tal forma que se incorpore el concepto de incertidumbre en el proceso.

Con el objetivo de entender algunos aspectos más puntuales de la dinámica de los sistemas complejos²⁸, en la próxima sección abordamos uno de los comportamientos que puede presentar un sistema complejo y que tiene implicaciones trascendentales relacionadas con la incertidumbre presente en las predicciones que realizamos (o intentamos realizar) de estos sistemas: los comportamientos caóticos.

1.4.2 Comportamientos caóticos

Vale la pena iniciar esta sección pidiendo al lector que haga un esfuerzo por abandonar la predisposición que le puede generar la palabra “caos”. Ya Smith (1998) ha advertido acerca de lo inconveniente que resultó escoger este nombre para el conjunto de descubrimientos científicos que reseñamos en esta sección; en este sentido, argumenta que el nombre es inconveniente toda vez que hace alusión únicamente a una parte de lo que hoy en día se conoce como “teoría del caos”. Si bien los primeros descubrimientos en esta área del conocimiento estuvieron asociados a una noción de desorden - de ahí la denominación de “caos”²⁹ -, como expondremos más adelante, los avances posteriores también permiten asociar dicha teoría con la idea opuesta: la de orden.

Epistemológicamente hablando, la importancia de la teoría del caos ha sido tal que Smith (1998) la calificó como la tercera gran revolución científica de la física durante el siglo XX, equiparándola con la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica. Por su parte, Baranger (2000) ha advertido que la teoría del caos ha sacudido los cimientos de la ciencia, al plantear algo que no se creía posible: que sistemas dinámicos cuyos comportamientos están descritos por reglas matemáticas aparentemente simples, pueden exhibir comportamientos “extraordinariamente intrincados”.

²⁸ Vale la pena mencionar que no necesariamente nos estamos refiriendo a aplicar el enfoque planteado por la dinámica de sistemas.

²⁹ Etimológicamente, la raíz griega de la palabra caos, χάος, está asociada con la idea de desorden en contraposición al concepto de cosmos, κόσμος, que tiene la connotación de orden.

De particular interés para el objetivo de este trabajo de investigación - incorporar el concepto de incertidumbre en los modelos que elaboramos en el marco de una EIA -, Baranger (2000) afirma que, gracias a la teoría del caos, es posible concluir que el cálculo - aquella herramienta aparentemente todopoderosa del mecanicismo - no tiene poder infinito; de hecho, existe un gran número de preguntas matemáticas que no pueden responderse aplicando las herramientas que ofrece el cálculo de Newton y Leibniz. Pareciera ser (¿son descubrimientos muy recientes!) que aquellas preguntas que se pueden responder analizando curvas suaves³⁰ - a las que se puede aplicar el arsenal matemático del cálculo - son la excepción y no la regla.

Históricamente, suele asociarse el descubrimiento de los comportamientos caóticos con el matemático y meteorólogo estadounidense Edward Lorenz; sin embargo, aunque no se refirió a ellos como “caos”, los primeros análisis de este tipo de comportamientos los realizó el polímata francés Henri Poincaré a finales del siglo XIX y a lo largo de la primera mitad del siglo XX (¿recuerdan el problema de los tres cuerpos reseñado previamente?) (Berliner, 1991).

Posteriormente, en la década del 60 y gracias a los avances tecnológicos disponibles en la época, Lorenz realizó simulaciones a partir de un modelo matemático muy simplificado del fenómeno de convección atmosférica. Lorenz construyó su modelo a partir de las ecuaciones de la dinámica de fluidos planteadas por el físico francés Claude Louis Marie Henri Navier y por el físico irlandés George Gabriel Stokes - las ecuaciones de Navier-Stokes -, llegando a un conjunto de ecuaciones diferenciales por cuya simplicidad el mismo Lorenz sentía algo de vergüenza (¡que ironía!) (Leys, Ghys & Alvarez, 2013).

Usando computadores de la época, Lorenz escribió un código con el que pretendía predecir el comportamiento del estado del tiempo, a partir del modelo que había construido y usando como datos de entrada valores que representaban variables como la presión barométrica y la temperatura. A partir de estas simulaciones y gracias a un afortunado accidente científico, el meteorólogo obtuvo resultados que lo desconcertaron; realizó dos simulaciones consecutivas con una sutil diferencia: los valores que ingresó en la primera simulación tenían seis cifras significativas, mientras que los de la segunda simulación únicamente tres. Al comparar los resultados de las dos simulaciones, encontró que, a pesar de la ligera diferencia en los valores ingresados, los resultados eran dramáticamente diferentes (Smitherman, 2004). El análisis teórico de la respuesta que obtuvo, fue presentado por el mismo Lorenz en el famoso paper *Deterministic Nonperiodic Flow* publicado en 1963.

³⁰ Se denominan “curvas suaves” a aquellas funciones que no cambian bruscamente. Una curva suave podría ser, por ejemplo, la representación gráfica del comportamiento de un sistema.

Para entender los análisis que en su momento hizo Poincaré y los descubrimientos posteriores de Lorenz y otros científicos es necesario partir del concepto de sistema dinámico. Tal y como mencionamos cuando introducimos el concepto de sistemas complejos, un sistema dinámico es aquel que se caracteriza por exhibir un comportamiento que cambia a lo largo del tiempo y cuya salida depende tanto de las condiciones actuales del sistema como de sus estado pasado (ver sección 1.4.1). Este comportamiento puede representarse matemáticamente mediante un conjunto de ecuaciones a las que se denomina *ecuaciones de movimiento*; estas ecuaciones usualmente se usan para, a partir de unas condiciones iniciales suministradas, calcular la trayectoria del sistema determinando su estado futuro - en otras palabras, predecir (Baranger, 2000).

Precisamente, los comportamientos caóticos son propios de sistemas dinámicos - particularmente los no lineales; dichos comportamientos se caracterizan, de manera general, por los aspectos que reseñamos a continuación.

Sensibilidad a las condiciones iniciales

En algún punto a lo largo de nuestra formación educativa - quizá cuando aprendemos las nociones básicas de matemáticas y física - pareciéramos interiorizar las ventajas de pensar en términos de aproximaciones. Si quisiéramos estimar el tiempo *aproximado* que tardaríamos viajando por carretera entre 2 ciudades, bastaría con que conociéramos la distancia que tendríamos que recorrer para llegar de la una a la otra y fijar una velocidad de desplazamiento³¹; si bien el resultado de este cálculo no sería exactamente igual al tiempo que en efecto nos tomaría desplazarnos, sí representa una aproximación lo suficientemente útil - salvo que exista algún accidente u otra situación *inusual* en la carretera. Estas aproximaciones son muy útiles para tratar con sistemas no complejos cuyo comportamiento no es para nada caótico.

Ahora bien, si quisiéramos hacer el mismo ejercicio pero ahora tomando como destino y llegada dos puntos al interior de una ciudad con gran afluencia de tráfico, obtendríamos como resultado un valor que, en la mayoría de los casos, es bastante lejano del tiempo que en efecto nos tomaría desplazarnos. Para aquellos que solemos transportarnos usando sistemas públicos de transporte masivo, no será extraño el siguiente hecho: unos pocos minutos que nos adelantemos o retrasemos respecto a la hora en la que normalmente salimos a tomar transporte pueden implicar una diferencia significativa en la hora de llegada a nuestro destino, a pesar de que el recorrido es el mismo.

³¹ Con estos 2 valores se podría resolver la ecuación $tiempo=distancia/velocidad$

Precisamente, este fue el descubrimiento al que, por error, llegó Edward Lorenz al cambiar ligeramente los valores que ingresó para correr el modelo que había construido como representación del fenómeno de convección atmosférica. Hoy por hoy, a esta característica de los comportamientos caóticos se le denomina “sensibilidad a las condiciones iniciales” y, en su momento, fue explicada por Lorenz mediante la famosa analogía del efecto mariposa: ¿el aleteo de una mariposa en Brasil origina un tornado en Texas?³² Smith (1998) explica la analogía como sigue (p. 1):

“Una mariposa azul pequeña, supongamos, reposa en un cerezo en una remota provincia de China. Como suelen hacer las mariposas, mientras reposa ocasionalmente abre y cierra sus alas. Podría haber abierto sus alas dos veces justo ahora; pero en realidad solo las movió una vez. Y - gracias a que el sistema meteorológico exhibe dependencia a las condiciones iniciales - la diferencia minúscula en los remolinos de aire que se forman en los alrededores de la mariposa eventualmente hacen la diferencia en el estado del tiempo; dos meses más tarde, un huracán arrasa la parte sur de Inglaterra o se desvanece sin causar daños en el Atlántico.” [Traducción propia]

Cuando el comportamiento exhibido por un sistema presenta una característica de este tipo, se dice entonces que el modelo - o el sistema - es sensible a las condiciones iniciales (Smith, 1998). Precisamente, Johnson (2007) señala que el tráfico en grandes ciudades es un sistema en el que, más a menudo que no, se puede identificar esta característica.

AL respecto, Leys, Ghys y Alvarez (2013) resaltan que si un solo aleteo de una mariposa puede desatar un huracán, es posible concluir que también podría impedir que se genere. En esencia, el mismo principio aplica para los aleteos previos y posteriores de la misma mariposa, así como para el aletear de otros millones de mariposas, y las actividades de otras criaturas más poderosas y, en particular, de nuestra especie.

Por supuesto, este descubrimiento tiene implicaciones trascendentales para los ánimos predictivos de la ciencia. Para ilustrar estas implicaciones, a continuación rescatamos algunas palabras del propio Henri Poincaré (1946 citado en Berliner, 1991, p. 938)

³² La analogía parece haber surgido de una conferencia a cargo de Lorenz en la convención número 139 de la Asociación Americana para el Avance de la Ciencia en el año 1972, para la que el meteorólogo no dio un título. Fue entonces cuando su colega Philip Merilees le asignó como título a la charla “¿el aleteo de una mariposa en Brasil origina un tornado en Texas?”

“Una causa muy pequeña, que se nos escape, determina un efecto considerable que no podemos evitar ver y, entonces, se lo atribuimos al azar. Si pudiéramos conocer las leyes de la naturaleza con exactitud y la situación del universo en el instante inicial, podríamos predecir la situación de este mismo universo en el instante subsecuente. Pero incluso si las leyes naturales ya no nos guardaran secretos, sólo podríamos conocer la situación inicial de manera aproximada. Si eso nos permitiera prever la situación futura con el mismo grado de aproximación, que es todo lo que requerimos, diríamos entonces que el fenómeno ha sido predicho, que se rige por las leyes naturales. Pero este no siempre es el caso; puede ocurrir que pequeñas diferencias en las condiciones iniciales generen diferencias muy grandes en el fenómeno final; un ligero error en las primeras causaría un error enorme en el segundo. La predicción se vuelve imposible y tenemos fenómenos fortuitos”
[Traducción propia]

A propósito de las importantes implicaciones que tiene este descubrimiento en términos de la capacidad predictiva del método científico, hay un aspecto más que vale la pena considerar. La sensibilidad a las condiciones iniciales implica que, si pudiéramos representar gráficamente el comportamiento que predecimos va a tener un sistema - mediante un modelo que usamos para tal fin - y el comportamiento que en efecto este presenta, estas dos funciones empezarían en puntos muy similares - asumiendo pequeños errores inevitables en la medición o en la aproximación de decimales - pero *eventualmente* terminarían en puntos muy distantes. El interrogante que corresponde plantear es ¿qué tan rápido divergen estas dos representaciones? o, dicho de otra manera, ¿qué tan lejos en el futuro son útiles las predicciones que hagamos de estos comportamientos caóticos?

Al respecto, es muy importante resaltar que, a pesar del inmenso poder de cálculo del que disponemos hoy en día gracias al desarrollo de computadores cada vez más potentes, a la hora de realizar cálculos matemáticos estos poderosos dispositivos se valen de aproximaciones para realizar dichas operaciones. Por ejemplo, aunque el resultado teórico de la operación $((a+b)-a)$ siempre será igual al valor que tome b - recuerde que la suma es una operación conmutativa -, al asignarle valores no triviales a las variables a y b , por ejemplo $a = 10^7$ y $b = \sqrt{2} \times 10^{-5}$, el resultado calculado con una computadora no resulta exactamente igual al calculado teóricamente. Aunque estas diferencias son despreciables para la mayoría de problemas con los que hemos aprendido a trabajar, ¿lo son también cuando se trabaja con sistemas que exhiben comportamientos caóticos?

Desafortunadamente para los objetivos predictivos de la ciencia (afortunadamente para aquellos que encontramos deseable cierto componente de incertidumbre en la vida), los descubrimientos científicos señalan que estas dos representaciones - la que en realidad exhibe el sistema y la que corresponde a nuestra predicción -, luego

de agotada cierta ventana de tiempo que pareciera ser corta, divergen exponencialmente rápido (Smith, 1998; Baranger, 2000), volviendo inútiles nuestros intentos de refinamiento de cálculos, modelos y herramientas de medición.

Las implicaciones de tales descubrimientos bien pueden sintetizarse en la siguiente cita que se le atribuye al mismo Edward Lorenz refiriéndose a los comportamientos caóticos:

“Cuando el presente determina el futuro, pero el presente aproximado no determina aproximadamente el futuro”

Estabilidad estructural

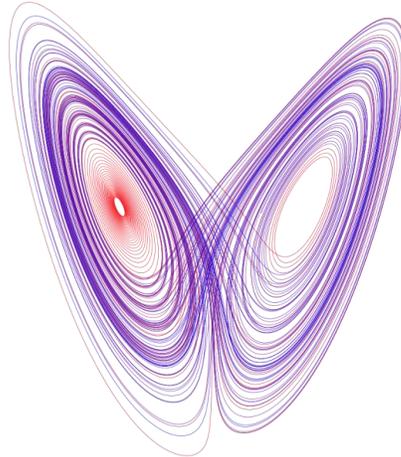
Es usual que cuando se habla de comportamientos caóticos se haga referencia únicamente al fenómeno de sensibilidad a las condiciones iniciales, más conocido como “el efecto mariposa”. Leys, Ghys y Alvarez (2013) advierten que esta gran popularidad puede explicarse gracias a que esta característica reconoce la existencia del libre albedrío, cosa que no hace el paradigma mecanicista en sus visiones extremistas. Sin embargo, por suerte para los anhelos predictivos de la ciencia, hay más aspectos a tener en cuenta cuando se habla de comportamientos caóticos; ejemplo de ello es el hecho de que - a diferencia de lo que sucede en ocasiones con los sistemas complejos - estos fenómenos son determinísticos en el sentido de que es posible plantear modelos matemáticos que describan el comportamiento del sistema.

Por otro lado, si bien 2 trayectorias - las representaciones gráficas que construyamos - que partan de puntos muy cercanos eventualmente tomarán caminos muy diferentes, también se ha identificado que tales caminos estarán necesariamente contenidos dentro de una región del espacio de representación que usemos; matemáticamente se habla de que las trayectorias son *atraídas* hacia esta región que se denomina “atractor”. Tal vez el ejemplo más popular de atractor sea la llamada “máscara de búho” conocida también como “el atractor de Lorenz” (Firth, 1991; Smith, 1998; Leys, Ghys y Alvarez, 2013).

Imagine que esta máscara de búho es el resultado de observar evolucionar a lo largo del tiempo la trayectoria que corresponde al comportamiento caótico de un sistema; eventualmente y con la ayuda de herramientas de computación que nos

permitan mantener un registro de los puntos por los que ya ha pasado la trayectoria, se obtendrá la famosa máscara de búho³³ (ver Fig. 4).

Figura 4: Atractor de Lorenz



Fuente: Imagen distribuida bajo licencia GFDL, tomada de:

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/f4/Lorenz_attractor.svg/1024px-Lorenz_attractor.svg.png

Aunque este atractor es particularmente famoso, Firth (1991) ha señalado que pueden existir atractores de diferentes tipos: puntos, bucles o curvas continuas confinadas a cierta región y que nunca se cruzan consigo mismas pero que nunca tampoco se cierran - como es el caso de la máscara de búho.

Es precisamente gracias a la existencia de estos atractores que es posible hablar, en cierta forma, de un sentido de orden presente en los comportamientos caóticos. Si bien no es posible determinar con precisión el futuro de la trayectoria que describe el comportamiento caótico de un sistema - impredecibilidad a nivel micro -, gracias a la existencia de atractores sí es posible saber que esta trayectoria va a estar confinada dentro de cierta región del espacio de representación - predictibilidad a nivel macro (Firth, 1991).

Acudiendo a esta estabilidad estructural, Leys, Ghys y Alvarez (2013) plantean que es posible realizar análisis útiles de estos comportamientos caóticos si nos concentramos en aquellos patrones que se puedan encontrar al contemplar la

³³ Resulta sumamente ilustrativa la simulación expuesta por Leys, Ghys y Alvarez (2013). Algunas características interesantes de este atractor es que la trayectoria, que eventualmente forma la máscara de búho, nunca cruza dos veces por el mismo punto, por lo que el atractor nunca se cierra.

estabilidad estructural general del sistema - los atractores. Por ejemplo, señalan, que si bien al ver una fotografía borrosa del rostro de una persona no podemos identificar con precisión los detalles del rostro, sí podemos llegar a reconocer a la persona.

A partir de la idea de que el aleteo de una mariposa puede bien desencadenar un huracán o bien impedirlo, Leys, Ghys y Alvarez (2013) proponen que, hablando del sistema meteorológico, las pequeñas modificaciones - los aleteos de las mariposas - no aumenten ni disminuyan la frecuencia de los fenómenos climáticos como los huracanes; lo único que pueden cambiar es el orden en que estos fenómenos se producen. Aunque advierten que esta hipótesis aún no ha sido probada científicamente, da una idea del tipo de análisis que podrían hacerse de sistemas que exhiban comportamientos caóticos, concentrándonos en sus características generales y no en aspectos particulares de su comportamiento.

En contraposición, es importante considerar que esta estabilidad estructural puede verse afectada por una gran sensibilidad de los modelos matemáticos que construyamos a pequeñas variaciones en parámetros que deben ser calibrados para que el modelo se ajuste a la realidad (Ou Yang, & Lin, 2011). Tal es el caso de la famosa “ecuación logística” que ha llamado la atención en diferentes áreas del conocimiento por la paradoja que plantea su aparente simplicidad matemática y los comportamientos caóticos que permite evidenciar. Al finalizar esta sección es posible encontrar una síntesis de los aspectos caóticos más sobresalientes asociados con este modelo matemático y que han sido estudiados previamente por May (1976).

Fractales

Hasta el momento, las dos características de los comportamientos caóticos que hemos reseñado han estado ligadas a la dimensión temporal del comportamiento del sistema; es decir, lo que pasa conforme transcurre el tiempo. Una tercera característica de estos comportamientos, los fractales, se refiere a su dimensión espacial (Baranger, 2000).

Aunque algunos autores señalan que los fractales son figuras geométricas que se caracterizan por un detalle y una longitud infinita y por ser auto-similares – lo que significa que son exactamente iguales o similares a una parte suya - (Chiew, 1991 citado en You, 1993), otros brindan definiciones más generales que plantean que los fractales son figuras geométricas que *no* se vuelven más simples cuando se les observa a una escala más detallada (Baranger, 2000).

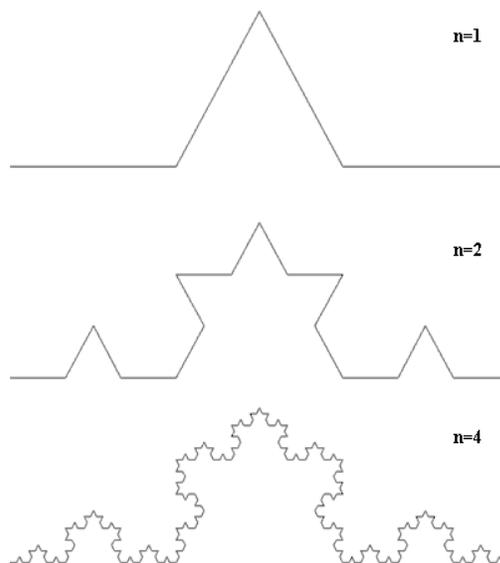
Los primeros fractales - al menos los que se reconocieron como tal - fueron creaciones matemáticas que, en principio, no parecían tener mayor trascendencia

científica más allá de la fascinación que despertaron en los matemáticos. Ejemplos de estas primeras creaciones son el Conjunto de Cantor de 1883, la estrella de Koch de 1904 y el triángulo de Sierpinski de 1915 (Baranger, 2000). A manera de ilustración, a continuación reseñamos el proceso de construcción de la estrella de Koch (figura 5), descrita inicialmente por el matemático sueco Helge von Koch en 1904 (Johnson, 2007, p. 76):

“Comience (...) dibujando una línea horizontal. Divídala entre tres, pero reemplace la pieza de la mitad por dos piezas que tengan una longitud igual a la de la pieza removida. Esto le arroja una línea recta con una forma de sombrero en la mitad (...). Tratando cada una de las piezas resultantes como una línea nueva, divida cada una entre tres y una vez más reemplace la pieza de la mitad por dos piezas de igual longitud. Siga repitiendo este procedimiento una y otra vez.” [Traducción propia]

Posteriormente, a partir de la década de 1970 se empezaron a identificar formaciones tipo fractal presentes en muchos lugares de la realidad en la que vivimos. Algunos ejemplos de estos lugares son las cordilleras, las ramificaciones de un árbol viejo saludable, el cuerpo humano, el patrón de los asentamientos humanos, una hoja de helecho, el cielo en un día nublado, el delineamiento de una zona costera o el contorno de un tumor maligno (Baranger, 2000; Johnson, 2007).

Figura 5: Construcción de la estrella de Koch



Fuente: Imagen distribuida bajo licencia GFDL. Tomada de:
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/89/Fractal_koch.png.

Se habla de que son fractales porque todas estas formaciones se caracterizan por no simplificarse conforme se les observa a una escala más detallada. Baranger (2000) señala que es precisamente esta característica la que impide analizar los fractales - i. e. la manifestación espacial de los comportamientos caóticos - utilizando el arsenal matemático del cálculo inventado por Newton y Leibniz tan poderoso para trabajar con curvas "suaves".

A partir de esta idea es posible entender las razones que hacen al enfoque mecanicista inadecuado también para tratar con las manifestaciones espaciales de la teoría del caos.

En este mismo sentido, Baranger (2000) ya ha advertido que quizás el ejemplo más paradójico de fractales son las llamadas "partículas elementales". A lo largo de la mayor parte del siglo XX, la física se concentró en el desarrollo de las consecuencias de la mecánica cuántica y de la teoría de la relatividad - 2 teorías, de acuerdo al autor, basadas fuertemente en la idea fundamental del cálculo: la idea de que el analizar las cosas a una escala más fina se hacen más simples. Si bien con estas investigaciones se buscaba usar estas 2 teorías para el estudio de las "partículas elementales" esperando encontrar las leyes fundamentales de la física y del universo, los resultados que se han obtenido en las últimas décadas son sorprendentes (p. 6):

"Al principio, las partículas elementales eran los átomos, tal como lo proclamó la etimología griega de la palabra. Pero, observando a una escala más fina, encontramos que los átomos en realidad se componen de un núcleo y electrones que se convirtieron en las nuevas partículas elementales. Una vez pudimos refinar la escala una vez más, descubrimos que los núcleos están compuestos por protones y neutrones, junto con una serie de primos y otros parientes. Unas décadas más tarde, gracias a los aceleradores de energía incremental, pudimos observar el mundo a una escala más fina aún y ahora sabemos que nuestras antiguas partículas elementales de hecho están compuestas de quarks de varios sabores y gluones. ¿Seguirá el proceso indefinidamente? Realmente no tenemos una buena razón para pensar que no. La física de partículas, el santuario interno del cálculo, en realidad es un gran fractal. Y este fractal posee una buena dosis de auto-similaridad, como se ejemplifica por la similaridad entre la espectroscopía atómica, la espectroscopía nuclear y la espectroscopía de hadrones." [Traducción propia]

Hasta el momento, estas 2 dimensiones que hemos presentado de los comportamientos caóticos, la temporal y la espacial, parecieran estar desconectadas; sin embargo, los descubrimientos científicos indican lo contrario. Baranger (2000) explica lo que él denomina como una conexión fuerte de la siguiente manera (p. 7):

“Tome un sistema dinámico caótico. Escoja una región simple en su espacio de fase³⁴, como una esfera, un cubo o cualquier otro volumen simple. Considere que esta región es un lugar geométrico de posibles condiciones iniciales. Luego, deje que el tiempo transcurra. Conforme cada punto de la región sigue su trayectoria, la región misma se mueve y cambia de forma. En el transcurso de su evolución, lentamente pero con seguridad la región se convertirá en un fractal. El fractal se completa conforme el tiempo transcurre y se completa cuando el tiempo tiende a infinito. Cada sistema dinámico caótico es una máquina que manufactura fractales. En el otro sentido, cada fractal puede verse como el posible resultado de la acción prolongada del caos temporal.” [Traducción propia]

De esta forma, Baranger (2000) asegura que aquellos sistemas complejos que exhiben comportamientos caóticos pueden verse como máquinas que fabrican fractales.

Esta revisión de los principales aspectos que caracterizan a los comportamientos caóticos lleva implícito un mensaje epistemológico de suma importancia. Aunque fenómenos como la sensibilidad a las condiciones iniciales o la ausencia de simplicidad al observar los fractales a escalas más finas implican que resulta inútil tratar de realizar predicciones de aspectos particulares de un sistema, la existencia de orden a nivel estructural señala que aún la ciencia - y los seres humanos - retiene un gran poder predictivo si se concentra en las propiedades estructurales de los sistemas que exhiben este tipo de comportamientos.

A manera de ejemplo, considere la siguiente situación. Pensando en un recién nacido, es posible predecir con una probabilidad alta que, dadas ciertas condiciones de salud al momento de su nacimiento, eventualmente el niño o niña caminará - lo estructural -; incluso podríamos aventurarnos a garantizar que dicho aprendizaje se materializará dentro de un rango de meses determinados, basándonos en experiencias previas y en el conocimiento científico que se tenga al respecto, y muy probablemente acertaríamos. Sin embargo, resulta inútil tratar de realizar predicciones más detalladas acerca de la semana o incluso el día - lo particular - en que el infante en efecto caminará.

Hasta el momento, si bien hemos enunciado algunos ejemplos de sistemas que pueden exhibir comportamientos caóticos, no hemos hecho referencia a la frecuencia con la que se presentan este tipo de comportamientos en diversos sistemas con los que interactuamos. Al respecto, Smith (1998) señala que, aunque los comportamientos

³⁴ Se le denomina espacio de fase a la representación gráfica que permite modelar todos los posibles valores que pueden tomar las distintas variables que se escojan para representar un sistema. De esta forma, el espacio de fase de un sistema se convierte en la representación gráfica que reúne todos los posibles estados que podría tomar el sistema en un momento dado.

caóticos se manifiestan únicamente en sistemas dinámicos no lineales, su presencia suele ser bastante frecuente, incluso cuando se trata de sistemas dinámicos no lineales aparentemente simples. En este sentido, vale la pena resaltar que la gran mayoría de sistemas con los que nos podemos encontrar en la realidad - fuera de un laboratorio - son, en efecto, sistemas dinámicos no lineales (Firth, 1991). Es posible concluir entonces, como lo señalan Leys, Ghys y Alvarez (2013), que al tomar un sistema dinámico arbitrario es altamente probable que dicho sistema pueda exhibir un comportamiento caótico.

A continuación, procedemos a enunciar algunos ejemplos de sistemas en los que se han identificado tales situaciones.

Baranger (2000) ha denunciado que, a pesar de que deberían ser los físicos teóricos y los matemáticos los más fascinados con este descubrimiento, han sido principalmente ingenieros de muchas áreas, algunos tipos de químicos, biólogos de poblaciones, cardiólogos, economistas e incluso psicólogos los que se han apoderado de la teoría del caos mucho antes que el común denominador de los físicos.

Si bien el sistema de ecuaciones diferenciales que Lorenz construyó para modelar el comportamiento del estado del tiempo es uno de los ejemplos más famosos cuando se habla de comportamientos caóticos, también se han identificado este tipo de comportamientos en la dinámica de sistemas biológicos, en las ecuaciones que gobiernan la dinámica de las neuronas, aquellas que describen dinámicas poblacionales, en el modelamiento del tráfico vehicular, de los mercados de acciones, de los latidos cardíacos³⁵, y en psicología y en el campo del diseño instruccional³⁶ dentro de las ciencias sociales (Holden, 1986; Firth 1991; Garfinkel et al., 1992 citados en Phelan, 2001; You, 1993; Barton, 1994).

De manera particular, en el campo de la biología ha llamado la atención en las últimas décadas el comportamiento caótico que exhibe una ecuación de gran simplicidad conocida como "ecuación de diferencia logística". Esta ecuación representa el número de individuos de una población al estudiar su reproducción en una temporada en la que las

³⁵ Precisamente, Firth (1991) realizó un interesante análisis del comportamiento caótico que caracteriza el funcionamiento del corazón de una persona a lo largo de su vida. De manera general, se tendrían 2 atractores: uno que representa el estado sano y otro que representa el estado muerto. Una enfermedad puede alejar el estado del corazón del atractor "sano", pero este, con o sin tratamiento médico, puede volver a él. Según su planteamiento, con la vejez o gracias a alguna enfermedad terminal, los dos atractores se acercarán hasta que eventualmente - resulta imposible predecir cuándo - se encuentren y se produzca la muerte de la persona.

³⁶ You (1993) define el diseño estructural (ISD) como la práctica de crear experiencias instructivas que hagan la adquisición de conocimiento y habilidades más eficiente, efectiva y atractiva.

generaciones no se traslapan y ha sido usada ampliamente por biólogos para calcular las variaciones estacionarias en la abundancia de especies (May, 1976).

Dicha ecuación está dada por la siguiente expresión matemática³⁷ (Ecuación 1):

$$X_{t+1} = aX_t(1 - X_t) \quad \text{[Ecuación 1]}$$

Donde: X_{t+1} representa el tamaño de la población en el instante $t + 1$

X_t representa el tamaño de la población en el instante t

a es un parámetro de calibración que determina la rapidez del cambio del tamaño de la población; es decir, la tasa de crecimiento

Conceptualmente, esta ecuación permite entender la relación que existe entre el tamaño de la población de una especie en determinada generación asociada con el tiempo $t + 1$ - es decir, el valor de X_{t+1} - y el tamaño de la generación precedente - es decir, el valor de X_t .

Según May (1976), los aspectos caóticos del comportamiento que se modela mediante esta ecuación se pueden observar en varios sentidos.

Por un lado, es posible identificar la presencia de atractores que significan la existencia de orden a nivel estructural. Gracias al análisis matemático, se sabe que, mientras $1 \leq a \leq 3$, cualquier valor inicial que tome el sistema - entre 0 y 1 - tenderá hacia cierto valor fijo que hará las veces de atractor del sistema. Si a toma valores ligeramente mayores a 3, aparecerán nuevos atractores; por ejemplo, para el caso en que $a = 3,3$ la función se volverá periódica indefinidamente (Figura 6).

Conforme a toma valores un poco más grandes aparecerán nuevos atractores para el sistema que se caracterizan por ser finitos y mantener la periodicidad de la función, siempre y cuando a sea menor a 3,57; más allá de este punto, la ecuación logística presenta un número infinito de atractores, por lo que se obtienen trayectorias

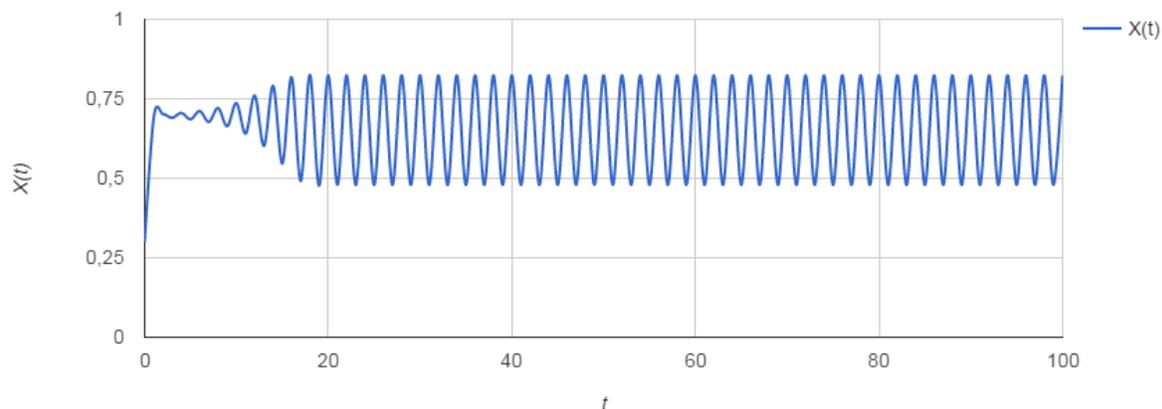
³⁷ Esta ecuación está expresada de manera canónica y requiere que se satisfagan algunas condiciones matemáticas como que el valor de la población inicial, X_0 , varíe entre 0 y 1 y que la constante de calibración a varíe entre 1 y 4; de otra forma, se obtendrá como resultado que la población crecerá hacia $-\infty$ en el caso que $a < 1$, lo que implicará que la población se ha extinguido, o el modelo tendrá un número infinito de atractores para valores de a mayores de 3,57. Para ver el tratamiento matemático detallado de la ecuación recomendamos consultar el trabajo de May (1976).

completamente aperiódicas - es decir que el patrón nunca se repite - para todos los valores de X_0 . Precisamente, esto es evidencia de la sensibilidad a los parámetros que caracteriza a este modelo matemático: una ligera modificación en el parámetro a puede llevar el modelo de representar una población que se extingue - 0 se comporta como un atractor - a tener tantos atractores que pareciera que el modelo es aleatorio³⁸.

Por otro lado, la gran sensibilidad del sistema a ligeros cambios en sus condiciones iniciales puede observarse cuando, por ejemplo, se escoge $a = 3,7$ y se grafica el comportamiento que se obtendría para dos condiciones iniciales muy similares: $X_0 = 0,30$ y $X_0 = 0,31$ (Figura 7).

Teniendo en cuenta que los valores que arroja la ecuación 1 siempre van a estar en el intervalo $[0; 1]$, resultan significativamente diferentes las dos respuestas obtenidas al variar el valor de una de las condiciones iniciales en tan solo el 3,3%.

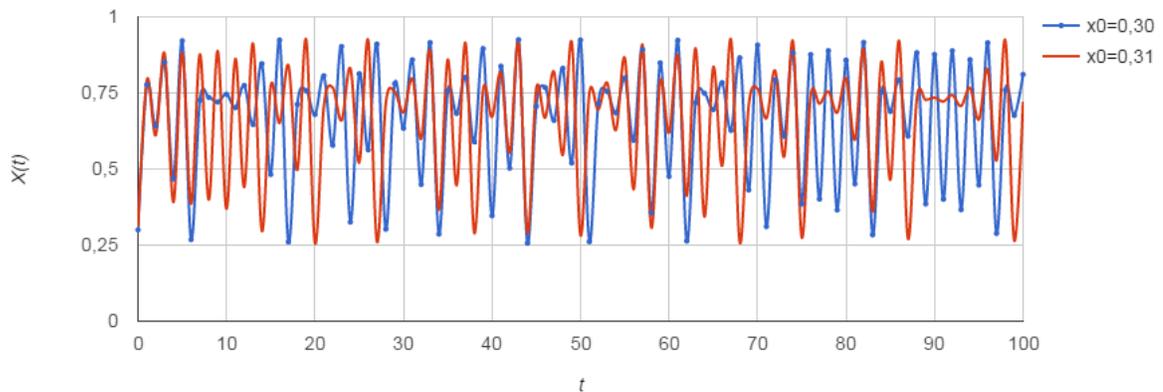
Figura 6: Simulación de la ecuación de diferencia logística para $X_0 = 0,3$ y $a = 3,3$



Fuente: Elaboración propia.

³⁸ May (1976) expone un diagrama de bifurcación en el que es posible observar el número de atractores del sistema en función del parámetro a .

Figura 7: Simulación de la ecuación de diferencia logística para $X_0 = 0,30$ (color azul) y $X_0 = 0,31$ (color rojo) con $\alpha = 3,7$



Fuente: Elaboración propia.

Adaptaciones de esta misma ecuación también modelan adecuadamente otros fenómenos en campos del conocimiento como el de la epidemiología, donde X es la fracción de población infectada en el tiempo t , en economía, donde X puede representar la relación entre la cantidad disponible de un bien y su precio, o las ciencias sociales, donde, refiriéndose a la velocidad de propagación de los rumores en los sistemas sociales, X puede representar el número de personas que han oído un rumor después de un tiempo t (May, 1976). El análisis de esta ecuación ha sido de tal importancia que Johnson (2007), 30 años después la sigue usando para explicar los comportamientos caóticos que *pueden* llegar a exhibir los sistemas complejos.

Precisamente, un último aspecto acerca de los comportamientos caóticos que vale la pena abordar es su relación con los sistemas complejos.

Mientras que la complejidad suele usarse como un término sombrilla que abarca muchos trabajos que han sido realizados por científicos en numerosos campos de investigación, la teoría del caos es uno de los descubrimientos particulares a través de los que se manifiesta la revolución científica que plantea la complejidad (Smitherman, 2004).

En este sentido, es importante resaltar la diferencia que existe entre los dos conceptos. Si bien la teoría del caos explica uno de los comportamientos que eventualmente puede exhibir un sistema complejo, esta teoría por sí sola no permite explicar (al menos no con el estado actual de desarrollo científico) ni la estructura, ni la auto-organización ni las demás características propias de los sistemas complejos reseñadas anteriormente (Waldrop, 1993). Al respecto, Baranger (2000) señala que no todos los sistemas dinámicos no lineales son caóticos todo el tiempo; por el contrario, estos comportamientos se presentan únicamente cuando el sistema adopta ciertas

configuraciones, por lo que se suele decir que la complejidad ocurre "*at the edge of chaos*".

En síntesis, la teoría del caos advierte que existe un tipo de sistemas - la mayoría con los que nos podemos encontrar -, particularmente los complejos, que eventualmente pueden exhibir comportamientos que, en la práctica, hacen imposible realizar predicciones útiles de su comportamiento a mediano y largo plazo. La imposibilidad radica en las pequeñas diferencias - imposibles de eliminar por completo - que existen entre los valores reales y aquellos que usamos para nuestros cálculos; diferencias que pueden deberse a pequeños errores en las mediciones realizadas o a aproximaciones que realicen las herramientas tecnológicas de las que nos valemos para realizar cálculos.

Estas diferencias se magnificarán exponencialmente conforme transcurre el tiempo, traduciéndose en grandes diferencias en el futuro. Desafortunadamente, aún es muy pronto para poder contar con estimados de tiempo que permitan determinar el momento a partir del cual estas predicciones dejan de ser útiles; sin embargo, resulta ilustrativo el caso del estado del tiempo - el ejemplo más famoso de la teoría del caos - en el que las predicciones que se realizan no son útiles más allá de un par de días en el futuro.

Como ya comentamos, esto no significa que la ciencia haya perdido su capacidad predictiva. Por el contrario, aparte de que todos los descubrimientos y avances que se han realizado de la mano del mecanicismo conservan su validez, Baranger (2000) argumenta que la teoría del caos es un complemento para el cálculo de Newton y Leibniz, ya que le permite a la ciencia enfrentarse a problemas para los que el cálculo no es la herramienta más adecuada.

En este sentido, You (1993) resalta que una de las ideas centrales a la teoría del caos - aunque no precisamente la más famosa - es que escondidas entre la imprevisibilidad de los fenómenos desordenados se encuentran profundas estructuras de orden. Esto permite plantear la paradoja de aleatoriedad local que coexiste con estabilidad a nivel global. El físico y químico belga Ilya Prigogine y la filósofa de la ciencia Isabelle Stengers han denominado a esta paradoja como "*order out of chaos*".

Agotando así los aspectos relevantes a la hora de construir modelos de fenómenos que nos interese predecir, en la siguiente sección abordamos algunas características propias de la información que usamos como insumos para los modelos y que también resultan esenciales a la hora de entender las limitaciones de esta labor predictiva.

1.4.3 Descripciones imperfectas

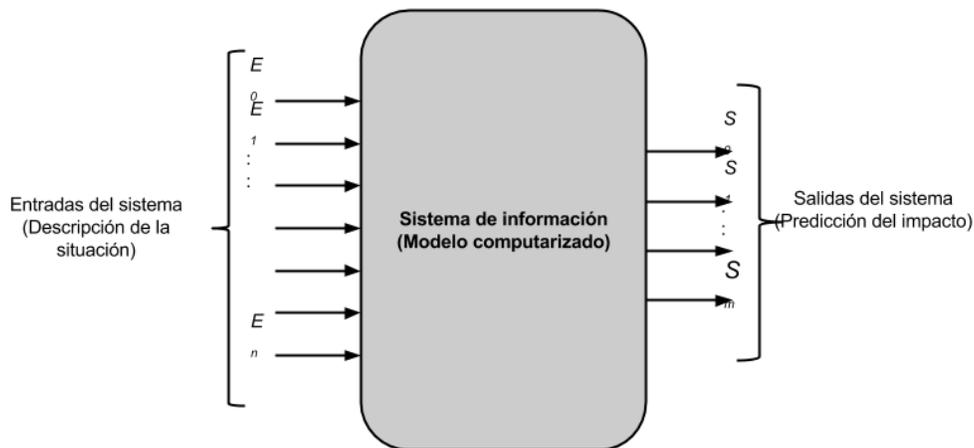
La inteligencia artificial es otra de las áreas del conocimiento que nutrió la construcción del marco teórico general que dio lugar a la configuración de la teoría de la complejidad en la década de los 80 al interior del Instituto Santa Fe (Walldrop, 1993).

Parsons (2001) describe la Inteligencia Artificial como un área del conocimiento que tiene por objetivo la construcción de sistemas basados en computadores que exhiban inteligencia; sin embargo, resalta el hecho de que el significado exacto de la palabra "inteligencia" en este contexto no esté claro. Inicialmente, hacia las primeras décadas del siglo XX, la definición estándar de "inteligencia" en un programa de computador era aquella dada por Alan Turing. Un programa de computador cuya inteligencia fuera a ser estimada debería estar conectado a un terminal operado por una persona, de tal manera que preguntas y respuestas pudieran ser intercambiadas por ambos extremos. Si, luego de un interrogatorio extensivo, la persona operando la terminal estaba insegura acerca de si la otra entidad con la que se estaba comunicando era un computador o una persona, entonces se podría considerar que el programa era inteligente. Lamentablemente, a pesar del optimismo inicial, pronto se aceptó que ningún programa iba a ser capaz de superar la prueba de Turing en el futuro cercano.

A su vez, como parte de los trabajos desarrollados en el marco de la Inteligencia Artificial, el problema de trabajar con cierto tipo de información que se denomina "imperfecta" ha sido reconocido como uno de gran importancia al tratar con sistemas de información (Motro & Smets, 1997; Parsons, 2001).

Motro y Smets (1997) definen un sistema de información como un modelo computarizado de un fenómeno de la realidad. En este sentido, puede argumentarse que la matriz de doble entrada que se construye utilizando programas de computador y que es usualmente utilizada en la EIA para realizar identificación y valoración de impactos ambientales es un sistema de información, que nos permite representar las interacciones entre un proyecto o actividad realizado por el ser humano y los diferentes componentes ambientales.

En esencia, al diseñar y operar sistemas de información se encuentra el mismo problema de modelamiento que hemos advertido anteriormente: todos los modelos que construyamos, incluyendo los sistemas de información, son sólo aproximaciones al fenómeno real. Gracias a la revisión del trabajo de Motro y Smets (1997), llaman la atención algunos componentes genéricos de un sistema de información, cuya conceptualización resulta útil para abordar este problema en el marco de este trabajo de investigación (ver Figura 8).

Figura 8: Esquema conceptual general de un sistema de información

Fuente: Elaboración propia a partir de Motro y Smets (1997).

A manera de ilustración considere el siguiente ejemplo. Cuando un empleador, utilizando cierto modelo computarizado, desea aplicar cierto método para el cálculo de los salarios que va a pagarle a sus empleados - la salida del sistema de información -, debe empezar por identificar algunas características de cada empleado - por ejemplo, su edad, años de experiencia laboral, experiencia académica, etc. - sobre las cuales aplicará ciertos criterios predefinidos - por ejemplo, una calificación ponderada - para llegar al valor deseado. En este caso, las características de cada empleado corresponden a la información que seleccionamos y recolectamos para describir a las personas - las entradas del sistema -, mientras que la programación de los criterios para definir el salario usando cierto software corresponden al sistema de información³⁹.

De manera similar a como sucede con el modelo computarizado, la información que seleccionemos y recopilemos para la descripción de una situación también se caracteriza por capturar únicamente una versión inexacta de la realidad, usando un nivel de abstracción que estará implícito en todas las aplicaciones en las que se use el resultado que entregue el sistema (Motro & Smets, 1997).

³⁹ Vale la pena resaltar que este modelo conceptual resulta útil en otras situaciones más allá del uso de sistemas informáticos. Considere, por ejemplo, la solución de un problema matemático simple en donde las ecuaciones usadas hacen las veces del modelo computarizado y los valores iniciales y el resultado obtenido corresponden a las entradas y salidas del sistema, respectivamente.

Este modelo conceptual resulta útil toda vez que es congruente con dos grandes grupos en los que es posible clasificar los factores que pueden incidir negativamente en la calidad - o utilidad - de la respuesta entregada por un sistema de información y que pueden abstraerse de la revisión del trabajo de Motro & Smets (1997): una descripción realizada de manera imperfecta y el procesamiento imperfecto de dicha descripción.

Teniendo en cuenta que las secciones anteriores de este trabajo están dedicadas a tratar aquellos aspectos que dificultan la elaboración de modelos útiles - tan aproximados como sea posible al fenómeno real - que nos permitan emular los fenómenos reales - es decir, procesar ciertas descripciones con el objetivo de anticipar el comportamiento del sistema -, lo que resta de esta sección está dedicado a analizar aquellos factores que pueden incidir en que describamos cierta situación de manera imperfecta. Vale la pena mencionar que la denominación “imperfecta” se usa en el sentido de que las descripciones o modelamientos de los fenómenos por su naturaleza no son representaciones idénticas a la realidad.

De manera general, Parsons (2001) resalta que las imperfecciones de los sistemas de información se deben principalmente a su capacidad finita de almacenamiento, a la precisión limitada de medición que tiene cualquier sistema y a la existencia de proposiciones que son inherentemente inciertas - por ejemplo, la afirmación “mañana lloverá”. Sin embargo, advierte que, aunque debemos reconocer que nuestros modelos son meras aproximaciones, no debemos dejar de refinarlos conforme el conocimiento progresa.

Partiendo de reconocer que un primer paso es reconocer la existencia de estas imperfecciones, Motro y Smets (1997) señalan la existencia de dos alternativas sensatas a considerar cuando se acepta esta inexactitud de los modelos que usamos:

1. Restringir el modelo a la porción del mundo real de la cual podemos hacer una representación absolutamente fiel a la realidad.
2. Desarrollar sistemas de información que nos permitan reconocer esta imperfección que caracteriza a nuestros modelos.

Teniendo en cuenta que la primera alternativa resulta poco práctica, es importante considerar las razones por las que se presenta esta imperfección en la información que usamos como insumo para los sistemas de información, toda vez que reconocerla, reducirla y/o formalizarla - la propuesta de este trabajo de investigación para la EIA - ayudaría a mejorar los procesos de toma de decisión (Dubois y Prade, 2006 citados en Tacnet, Dezert, Curt, Batton-Hubert & Chojnacki, 2014).

Aunque para finales del siglo pasado Smets (1997) advertía que los sistemas de información usados en ese entonces no lograban incorporar estas imperfecciones, algo similar podría argumentarse para la gran mayoría de sistemas de información de uso masivo hoy en día. Quizá, como lo advertía el autor, esto se debe a la gran dificultad que

conlleva entender - y formalizar - las formas en que pueden manifestarse tales imperfecciones; esta sección busca ser un aporte para superar esta dificultad.

Durante el proceso de selección y recopilación, toda la información es susceptible de exhibir ciertas características que la hacen imperfecta en el sentido previamente enunciado (Smets, 1997; Motro & Smets, 1997; Parsons, 2001). Aunque han existido numerosos intentos por proponer clasificaciones para estas características que hacen imperfecta la información que usamos⁴⁰, en palabras de Parsons (2001), lograr un consenso en esta materia es un “objetivo filosófico que no deberíamos esperar alcanzar pronto”; quizás el único consenso generalizado es que todas estas características están bien agrupadas bajo el concepto de “información imperfecta”.

Pese a esto, es posible identificar algunos conceptos reconocidos repetidamente por diferentes autores y de interés a la hora de tratar el problema de la información imperfecta en el marco de una EIA. A partir de un análisis de los trabajos de Smets (1997), Motro y Smets (1997), Parsons (2001) y Tacnet et al. (2014) fue posible extraer varios aspectos que hacen que las descripciones que hagamos de ciertos fenómenos sean imperfectas. Vale la pena aclarar que, dependiendo del autor que se consulte, las palabras utilizadas para referirse a uno u otro concepto pueden variar ligeramente⁴¹.

Información cualitativa y cuantitativa

Uno de los grandes ejes que estructura el trabajo de Parsons (2001) es el hecho de que los seres humanos tengamos que tratar en nuestro quehacer cotidiano con información tanto cuantitativa como cualitativa. Imagine, por ejemplo, tener que darle nuestra opinión a un amigo acerca de la comida en un restaurante que esté inaugurando, a la vez que lo ayudamos a calcular el número de personas que podría atender simultáneamente en el espacio disponible.

Las técnicas para manipular información cuantitativa han tenido un éxito notable al tratar con sistemas que se rigen en su mayor parte por las leyes de la mecánica, el electromagnetismo y la termodinámica. Este éxito nos ha hecho creer que estas técnicas pueden aplicarse también al tratamiento de otro tipo de sistemas como los sociales. Sin embargo, de hacerlo sin ninguna consideración especial, estaríamos obviando un hecho que Zadeh (2015) ha advertido en varias ocasiones: los procesos cognitivos humanos no están basados en valores numéricos precisos sino en valores difusos. Un ejemplo típico son los factores que permiten afirmar que una

⁴⁰ Para obtener una revisión detallada de las taxonomías propuestas recomendamos revisar el trabajo de Parsons (2001).

⁴¹ Smets (1997) expone un tesoro que recoge la mayoría de conceptos usados por diferentes autores.

persona es atractiva físicamente; por supuesto se pueden establecer algunos estándares cuantitativos - estatura, índice de masa corporal, proporciones faciales, etc. -, pero, en últimas, la decisión no puede reducirse únicamente a tales factores cuantitativos.

A partir del reconocimiento de esta característica, Parsons (2001) advierte la existencia de métodos formales para el tratamiento de ambos tipos de información que, de acuerdo a la situación en particular, deberían considerarse.

Información errónea

La información errónea es el tipo más simple de información imperfecta. Se dice que cierta información es errónea cuando es diferente de la información verdadera. Un tipo importante de información errónea es aquella que resulta ser inconsistente; este tipo de imperfección suele presentarse cuando se tienen varias representaciones del mismo aspecto del mundo real.

Considere, por ejemplo, la información inconsistente proveniente de bases de datos diferentes acerca de personas que suministran información falsa, preocupados por los altos impuestos o con el objetivo de acceder a distintos subsidios estatales (Kwan et al., 1997 citado en Parsons, 2001). Cuando estas representaciones son irreconciliables - es decir, cuando no tenemos los medios para corroborar cuál es la información verdadera - se dice que la información que se tiene es inconsistente.

Información imprecisa

Cuando la información que se tiene corresponde a un conjunto de valores dentro de los que está el valor verdadero pero no se tiene certeza acerca de dicho valor, se dice que esta información es imprecisa. Esta información suele presentarse de varias maneras; usando información disyuntiva - ej.: la edad de Juan es 31 o 32 -, información negativa - ej.: la edad de Juan no es 32 -, rangos de información - ej.: la edad de Juan está entre 30 y 35 - o información con márgenes de error - ej.: la edad de Juan es 31 ± 1 .

A su vez, esta categoría de información imperfecta suele dividirse en categorías más pequeñas que denotan tipos de imprecisiones; a continuación enunciamos algunas de estas categorías que son relevantes para este trabajo de investigación:

- Información ambigua: Tiene varios significados; por ejemplo, la afirmación "María no quiere a su tía porque es muy envidiosa". ¿Quién es envidiosa, María o su tía?

- Información vaga: Insuficientemente definida; por ejemplo, la afirmación “Juan vive con su abuela”. ¿Cuál abuela, la materna o la paterna?
- Información sesgada: Información contaminada con un error sistemático

En relación con la información ambigua y la información vaga, la diferencia radica en que en el primer caso la información suministrada puede tener varios significados, mientras que en el segundo caso el significado no está en discusión, sólo se requiere más información para determinar con cuál abuela vive Juan.

Acercas de la información sesgada, es importante tener en cuenta que esta información bien puede deberse a un error en los instrumentos de medición que se utilicen y que se manifiesta aleatoriamente en todas las mediciones que se hagan con dicho instrumento, o a cierta subjetividad que tenga la persona que seleccione y recopile la información. En cualquier caso, este sesgo hará que la información tenga cierta desviación del valor verdadero. En relación con el sesgo que experimentamos los seres humanos, resulta muy ilustrativo un famoso experimento realizado por los psicólogos sociales Richard Nisbett y Tim Wilson y reseñado por Tangen (2014).

En el experimento, los científicos les pedían a personas elegidas aleatoriamente que, a partir de cuatro muestras de calcetines, escogieran el que les pareciera de mejor calidad. Finalizada la prueba, los científicos observaron que cada calcetín fue escogido en una proporción diferente⁴², indicando que no había un consenso acerca de cuál era el calcetín de mejor calidad. Lo que resulta realmente llamativo es que, aunque las personas que participaron en el experimento no lo sabían, los cuatro calcetines utilizados eran exactamente iguales. La conclusión a la que llegaron los investigadores - y que ha sido reforzada por estudios posteriores - es que las decisiones que tomamos los seres humanos son altamente subjetivas - es decir, dependientes de la persona que toma la decisión y no solo del hecho sobre el que se decide -, como resultado de diversos factores como, por ejemplo, nuestras creencias previas.

Información incierta

Se usa este concepto para referirse a aquellas situaciones en las que no tenemos confianza absoluta acerca del conocimiento que tengamos de una situación - presente o futura - debido a que este es limitado.

Vale la pena resaltar que al hablar de imprecisión e incertidumbre los límites entre una categoría y otra pueden resultar bastante difíciles de identificar (Tacnet et al.,

⁴² Calcetín #1: 12%, calcetín #2: 17%, calcetín #3: 31%, calcetín #4: 40%.

2014); sin embargo, no hacen referencia a las mismas situaciones. Smets (1997) expone los siguientes ejemplos con el objetivo de diferenciar las dos categorías:

1. Juan tiene al menos dos hijos y estoy seguro de ello.
2. Juan tiene tres hijos pero no estoy seguro de ello.

Mientras que en el primer caso, a pesar de no existir incertidumbre, la información de la que se dispone es imprecisa, en el segundo caso, a pesar de que la información es precisa, existe incertidumbre respecto a su veracidad. En este sentido, Smets (1997) habla de la existencia de un “principio de maximalidad” entre estas 2 características: a mayor imprecisión menor incertidumbre y viceversa.

Vale la pena resaltar que al tratar con este aspecto de la información imperfecta, es muy usual encontrar el intenso debate filosófico, aún sin saldar, acerca de si esta incertidumbre puede clasificarse en epistémica - y por ende reducible - y aleatoria - e irreducible⁴³.

Información descontextualizada

Un aspecto más que vale la pena resaltar - aunque no es usual que se incluya al hablar de “información imperfecta” - es la importancia que puede tener en algunas situaciones el contexto del que se tome cierta información.

Adoptando la definición genérica expuesta por Dey (2001), entendemos por contexto aquella información implícita en determinada situación y que, junto a otros elementos, los seres humanos aprovechamos para transmitirnos ideas y reaccionar apropiadamente. Sin embargo, como señala Dey (2001) esta actividad no se da fácilmente cuando los seres humanos interactuamos con un computador - o con un sistema de información.

Para el caso de la afirmación “Juan vive con su abuela”, suponga que originalmente esta frase se dio en una conversación entre dos amigos que conocían a Juan, por lo que disponían de información implícita - el contexto - que les permitía determinar a qué abuela de Juan se referían - por ejemplo, puede que una de las dos abuelas ya hubiera fallecido -; sin embargo, al extraer la frase de la situación original sin tener en cuenta el contexto la información pierde significado y, en el caso del ejemplo, queda definida de manera vaga.

⁴³ Algunos aspectos de este debate fueron reseñados previamente en este trabajo (ver sección 1.1)

Hasta hace relativamente poco, casi todos los aspectos de la información imperfecta eran modelados mediante la Teoría de la Probabilidad, pero en las últimas décadas se han desarrollado nuevos modelos para representar y procesar esta información. El gran número de modelos que se han desarrollado refleja el reconocimiento reciente de que existen muchos aspectos de la imperfección que la Teoría de la Probabilidad, tan útil como ha sido, es insuficiente para representar (Smets, 1997; Parsons, 2001; Tacnet et al., 2014).

Una revisión de todos los métodos que se han desarrollado fuera de la Teoría de la Probabilidad es un objetivo que supera el alcance de este trabajo de investigación⁴⁴; sin embargo, según Parsons (2001), la mayoría de científicos interesados por la incertidumbre están interesados en los métodos reunidos en la Teoría de la Probabilidad (Lendley, 1965, citado en Parsons, 2001), la Teoría de la Posibilidad (Dubuois & Prade, 1988; Zadeh, 1978, citados en Parsons, 2001) y la Teoría de la Evidencia (Shafer, 1976; Smets & Kennes, 1994, citados en Parsons, 2001)⁴⁵.

El desarrollo de estos nuevos modelos para representar información imperfecta se ha justificado argumentando que la Teoría de la Probabilidad no es el método adecuado para manejar todos los tipos de información imperfecta, ya que no permite manejar la información de la misma manera que lo hacemos los seres humanos. Estas diferencias entre un enfoque y otro no han impedido que se realicen avances tanto en el marco de la Teoría de la Probabilidad como fuera de ella, lo que ha ocasionado un intenso debate tratando de determinar cuál es el mejor método (Parsons, 2001).

En este sentido, Smets (1997) plantea que ninguno de los modelos desarrollados puede adaptarse a todas las formas de imperfección de la información, por lo que argumenta que deben usarse de manera complementaria. Precisamente, señala Parsons (2001), este es el enfoque adoptado por una escuela de pensamiento que ha surgido en las últimas décadas con autores como Fox (1986, citado en Parsons, 2001), Safiotti (1987, citado en Parsons, 2001) y Krause y Clark (1993, citado en Parsons, 2001).

Conceptualmente, los diferentes métodos que se han desarrollado en el marco de estas teorías involucran la asignación a ítems de información de una medida numérica que representa el grado en el que el ítem es cierto o se sospecha o se cree que lo es; asimismo, estos métodos contemplan la agregación de estas medidas numéricas con el

⁴⁴ Parsons (2001) realiza una revisión juiciosa de varios de estos métodos y aun así reconoce que no alcanza a incluir todos los métodos existentes.

⁴⁵ Debido a que tradicionalmente estas tres teorías han sido vistas como rivales, podría esperarse que fueran radicalmente distintas; sin embargo, algunos autores señalan que son bastante similares. Determinar la relación que existe entre estas teorías es una tarea que excede el objetivo de este trabajo de investigación; sin embargo, los trabajos de Parsons (2001) y Klir y Yuan (1995) pueden resultar ilustrativos en ese sentido.

objetivo de derivar el grado en que una conclusión es cierta o se sospecha o se cree que lo es. Para alcanzar estos objetivos, estos métodos suelen estar especificados de una manera matemática precisa (Parsons, 2001).

A pesar de ser estos los métodos que usualmente se asocian con el tratamiento de información imperfecta, es importante tener en cuenta que todos presentan una limitante común por el hecho de ser métodos numérico-cuantitativos: en todos los casos las medidas numéricas que busca calcular cada método dependen del juicio de expertos quienes, dependiendo de la situación, pueden encontrarse con bastantes dificultades a la hora de realizar una asignación numérica. En este sentido, Parsons (2001) resalta la existencia de modelos simbólico-cualitativos que plantean maneras ingeniosas de solucionar este problema, permitiendo obtener información que, aunque es menos precisa que aquella suministrada por los métodos numéricos-cuantitativos, a menudo resulta suficiente.

A propósito de trabajos como el de Duarte (2000) y el de Peche y Rodríguez (2009) relacionados tanto con la EIA como con conceptos esenciales de la Teoría de la Posibilidad, consideramos pertinente realizar algunas consideraciones finales respecto de este enfoque para el manejo de la información incierta.

Teoría de la Posibilidad fue el nombre que el ingeniero eléctrico Lotfi Zadeh le dio al desarrollo de un marco teórico y conceptual y los correspondientes formalismos matemáticos para tratar ciertos tipos de imperfecciones presentes en la información y cuyo manejo escapa al ofrecido por la Teoría de la Probabilidad convencional. Dicha teoría fue construida a partir de desarrollos conceptuales, como el de los conjuntos difusos o el de las variables lingüísticas, previamente realizados por Zadeh y que fueron sintetizados en esta nueva teoría en su paper "Fuzzy sets as a basis for the theory of possibility" publicado en 1978 (Zadeh, 2015).

Una de las principales limitaciones de la Teoría de la Probabilidad a la hora de tratar con información incierta es que desconoce una realidad básica: específicamente en los procesos cognitivos humanos, casi todas las abstracciones que se hagan tienen fronteras que no son bien definidas. Por lo tanto, la Teoría de la Probabilidad no puede ofrecer respuestas útiles a preguntas del estilo ¿Cuál es la probabilidad de que María sea joven? De manera más general, la Teoría de la Probabilidad no tiene la capacidad de computar información que se describe usando lenguaje natural (Zadeh, 2015).

Zadeh (2015) advierte que la Teoría de la Probabilidad está basada en lógica bivalente que busca asignar valores numéricos bien definidos a la certeza que se tenga de la ocurrencia de cierto fenómeno o evento. Esta lógica bivalente, en la que se basa ampliamente la ciencia incluso hoy en día, propone establecer fronteras bien definidas entre 2 conjuntos diferentes - ¿a partir de qué estatura se es bajo o alto? -; una tradición cartesiana (¿recuerdan los aportes de René Descartes al mecanicismo?) profundamente arraigada (Zadeh, 2015).

El problema, señala Zadeh (2015), es que esta lógica se ha adoptado a tal punto que se ha sobrevalorado más allá de su utilidad. Precisamente, una de las principales contribuciones de la lógica difusa - y de la Teoría de la Posibilidad - planteada por Zadeh consiste en “proveer una base para que se dé una progresión desde la binarización a la graduación, de la binarización al pluralismo, del blanco y negro a una escala de grises” (p. 1). Esta graduación involucra asociar conjuntos de cosas sin fronteras bien definidas, atendiendo el hecho de que la mayoría de palabras que usamos en nuestro lenguaje cotidiano - y en los procesos cognitivos que realizamos - son etiquetas que corresponden a tales tipos de conjuntos.

El interés de Zadeh por estos temas, lo llevó a proponer una Teoría de Incertidumbre Generalizada (GTU, por sus siglas en inglés) cuyo punto de partida es la premisa de que hay muchos tipos de incertidumbre y muchos enfoques para tratarlas. Esta propuesta fue presentada en los papers “Toward a generalized theory of uncertainty (GTU) —an outline” de 2005 y “Generalized theory of uncertainty (GTU) —principal concepts and ideas” de 2006, ambos escritos por Zadeh.

Teniendo en cuenta que una revisión detallada de los métodos existentes para tratar información imperfecta sobrepasa el alcance de este trabajo y agotados los aspectos que consideramos más relevantes en cuanto a descripciones imperfectas se refiere, a continuación presentamos las conclusiones más importantes de este primer capítulo.

1.5 Entonces... ¿cómo abordar la incertidumbre?

A partir del enfoque propuesto inicialmente (ver Figura 1), este capítulo está dedicado a la construcción de un marco teórico que permita identificar dificultades que pudieran incidir negativamente en el nivel de certeza involucrado en la predicción de impactos ambientales en el marco de una EIA. Resultado de dicha construcción, surgen varios puntos importantes que sintetizamos a continuación.

En primer lugar, debe partirse de reconocer que tanto las descripciones que hacemos de una situación como los modelos que usamos para representar fenómenos de la realidad son meras aproximaciones de las situaciones y de los fenómenos reales; por ende, nunca podremos realizar predicciones completamente exactas. En este sentido, una posición razonable es aceptar que las predicciones que hagamos acerca del comportamiento de un sistema serán aproximaciones de lo que en realidad sucederá.

Cobra importancia, entonces, hablar del grado en el que nos son útiles las predicciones que realizamos y, por tanto, el grado en que nos son útiles las descripciones que realicemos y los modelos que construyamos para tal fin. Como bien hemos señalado ya,

los modelos que hemos aprendido a construir gracias al paradigma científico mecanicista son herramientas lo suficientemente útiles para predecir una gran cantidad de fenómenos, lo que ha permitido el desarrollo de incontables avances científicos y técnicos en diversas áreas del conocimiento.

Sin embargo, pese a lo que algunos científicos esperaban hace algunas décadas, este mismo desarrollo científico ha traído consigo el aprendizaje de que existen fenómenos para los que no nos es posible realizar predicciones útiles al abordarlos únicamente mediante el enfoque y las herramientas que ofrece este paradigma científico. Particularmente a lo largo del siglo XX, algunos sectores de la comunidad científica se han enfocado en la búsqueda y desarrollo de alternativas para abordar aquellos fenómenos para los que el enfoque mecanicista resulta insuficiente por sí solo. Muchos de estos avances fueron recogidos por científicos y académicos reunidos durante la década del 80 en el Instituto Santa Fe, dando origen formal a la Teoría de la Complejidad.

El análisis realizado de algunos de estos avances ha permitido identificar varias fuentes de incertidumbre que impiden que las predicciones que realizamos respecto de fenómenos complejos sean aproximaciones útiles. De acuerdo al enfoque abordado inicialmente, proponemos agrupar estas fuentes de incertidumbre en tres grandes categorías; por un lado, tendremos (i) aquellas debidas a dificultades en la construcción y (ii) en la aplicación de un modelo en particular⁴⁶ y, por otro, (iii) las imperfecciones propias de la información que utilizamos para describir una situación y que sirve de insumo para el modelo elaborado.

Dicho en lenguaje matemático básico, lo que estamos planteando es que al considerar una relación entre dos variables x y y dada por la función $f()$ - relación expresada matemáticamente como $y=f(x)$ - existen fuentes de incertidumbre tanto en la variable x como en la función $f()$, que se manifiestan en la diferencia entre el valor que toma la variable y - la predicción - y lo que en efecto sucede.

De manera más particular, hemos logrado identificar 11 fuentes de incertidumbre que se desprenden de los tres grupos mencionados previamente y que describimos a continuación (Figura 9).

1. Fenómenos aleatorios: se refiere a todos aquellos aspectos de los fenómenos complejos que, al menos con el estado actual de la ciencia, nos es imposible anticipar. Hablamos entonces de incertidumbre externa o

⁴⁶ Usualmente se trata de una ecuación o un operador matemático, pero no necesariamente debe ser así.

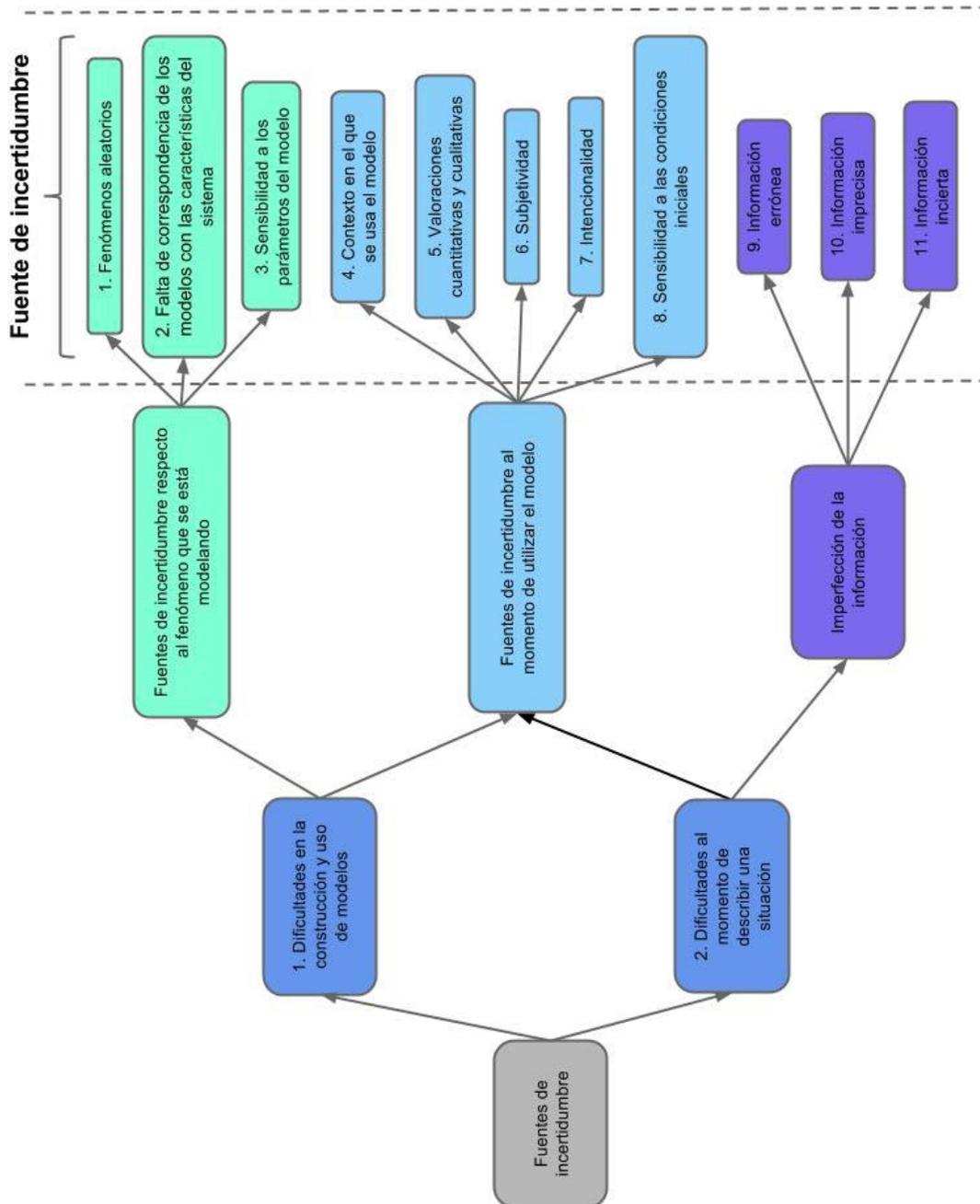
aleatoria o, en términos matemáticos, de fenómenos no determinísticos (ver secciones 1.1 y 1.4.1).

2. Falta de correspondencia de los modelos con las características del sistema: en este caso buscamos referirnos a la existencia de incertidumbre interna o epistémica que se presenta cuando nos damos a la tarea de modelar un sistema; si bien pueden existir muchos experimentos e investigaciones que han llevado a un buen nivel de conocimiento acerca del sistema en cuestión, por diversas razones es posible que el encargado del diseño de un modelo o quien lo aplique no esté al tanto (ver secciones 1.1 y 1.4.1).
3. Sensibilidad a los parámetros del modelo: asumiendo que hemos logrado sintetizar todo el conocimiento relevante en cierto modelo, hemos visto que cuando este modelo describe un comportamiento caótico de un fenómeno complejo, el modelo - y su(s) salida(s) - será muy sensible a pequeños cambios en sus parámetros (ver sección 1.4.2).
4. Contexto en el que se usa el modelo: gracias a la capacidad de los sistemas complejos de responder activamente a las condiciones cambiantes de su entorno y a la importancia de la información implícita en las situaciones que describimos, la omisión del contexto en el que se aplica cierto modelo o del que se toma cierta descripción puede afectar significativamente el grado de utilidad del modelo y de la descripción (ver secciones 1.4.1 y 1.4.3).
5. Valoraciones cuantitativas y cualitativas: teniendo en cuenta la naturaleza de las valoraciones que hacemos los seres humanos y la utilidad de las técnicas para el tratamiento de información cuantitativa, la traducción entre uno y otro tipo de valoración puede implicar incertidumbre en el resultado (ver sección 1.4.3).
6. Subjetividad: hace referencia a todos los factores que, de manera inconsciente, inciden en las elecciones que hace una persona a la hora de aplicar un modelo o describir una situación (ver sección 1.4.3).
7. Intencionalidad: a diferencia de la situación anterior, en este caso nos referimos a los factores que inciden de manera consciente en la forma en que una persona utiliza cierto modelo o describe una situación (ver sección 1.2).
8. Sensibilidad a las condiciones iniciales: se refiere a las implicaciones que puede tener sobre la predicción realizada, nuestra capacidad limitada para

realizar mediciones completamente exactas y las aproximaciones que realizan las herramientas que usamos para realizar cálculos, gracias a la naturaleza de los comportamientos caóticos que exhiben algunos sistemas complejos (ver sección 1.4.2).

9. Información errónea: hace referencia principalmente a las implicaciones que tiene contar con información inconsistente proveniente de varias fuentes secundarias (ver sección 1.4.3).
10. Información imprecisa: agrupa todas las características que denotan imprecisión de algún tipo en la información con la que se cuenta (ver sección 1.4.3).
11. Información incierta: se refiere a la incertidumbre interna y externa que pueda presentarse en las descripciones que realizamos (ver sección 1.4.3)

Figura 9: Fuentes de incertidumbre al tratar de predecir el comportamiento de un fenómeno complejo



Fuente: Elaboración propia.

Es importante tener en cuenta que el hecho de poder identificar dichas fuentes no implica que pueda eliminarse por completo la incertidumbre que le imprimen a nuestras predicciones; por el contrario, según Meadows (2009), el análisis de sistemas complejos indica que - al menos con el estado de desarrollo actual de la ciencia - estos sistemas son inherentemente impredecibles (pp. 167 - 168):

“el objetivo de prever el futuro de manera exacta y prepararnos perfectamente es irrealizable. Nunca podremos entender completamente nuestro mundo, no en la forma que hemos aprendido a esperar gracias a nuestra ciencia reduccionista. Nuestra ciencia en sí misma, desde la teoría cuántica hasta la matemática del caos, nos conduce a una incertidumbre irreducible” [Traducción propia].

Ante la existencia de estas fuentes de incertidumbre existen dos opciones. Por un lado, sería posible - no por ello deseable - ignorar la existencia de estas imperfecciones y tomar decisiones basándonos en un sentido de certidumbre artificial y obviando lo inútil que resultaría el proceso; por otro lado, podría reconocerse su existencia y, por tanto, adoptar acciones en dos sentidos: continuar refinando los modelos que construimos por medio del mejoramiento científico, reconociendo la imposibilidad de eliminar todas las fuentes de incertidumbre y formalizando aquellas que, al menos de momento, resultan irreducibles. Esta última es precisamente la estrategia que adoptamos en este trabajo de investigación y a la que nos referimos al hablar de “incorporar el concepto de incertidumbre”.

En este sentido, consideramos que este refinamiento de los modelos y formalización de las incertidumbres irreducibles debe realizarse aplicando los enfoques mecanicista y complejo de manera complementaria (¡las herramientas del mecanicismo siguen siendo útiles!); en esencia, ambos enfoques proponen métodos para perseguir uno de los objetivos fundamentales de la ciencia: encontrar regularidades en la realidad (Checkland, 1993; Phelan, 2001; Meadows, 2009).

Esta búsqueda de complementariedad está justificada por la noción de balance que se desprende de lo que Zadeh (1973) llamó el “principio de incompatibilidad” (p. 28):

“Declarado de manera informal, la esencia de este principio es que conforme la complejidad de un sistema incrementa, nuestra habilidad para hacer afirmaciones precisas y significativas acerca de su comportamiento disminuye, hasta que se alcanza cierto umbral más allá del que la precisión y la significancia (o relevancia) se vuelven características casi mutuamente excluyentes” [Traducción propia].

En otras palabras, el planteamiento de Zadeh (1973) obedece a un hecho que ha advertido en repetidas ocasiones: tan útiles como son las técnicas para el manejo de datos numéricos precisos, cuando se inicia una búsqueda por más precisión llega un punto en que estas técnicas son incompatibles con la gran complejidad de los procesos

cognitivos humanos. Superado este umbral, aunque podamos alcanzar un mayor nivel de precisión, este no se traducirá en una mayor relevancia o en un mayor significado para las afirmaciones que podamos realizar los seres humanos - nuestros procesos cognitivos mediando - sobre sistemas de complejidad comparable a la de nuestros procesos cognitivos. Advierte Zadeh (1973) que, entonces, para evitar que nuestras afirmaciones pierdan significado, es posible que debamos renunciar a los exigentes requerimientos en términos de precisión de aquellos análisis matemáticos que hemos aprendido a realizar para los sistemas “mecanísticos”.

A manera de ilustración considere la siguiente situación⁴⁷. Desde el año 2011, gracias a la ley 1450 de ese año, el país inició el proceso de delimitación de sus ecosistemas de páramo con cartografía a escala 1:25.000. Partiendo de una cartografía a escala 1:250.000, en el mes de septiembre de 2012 finalizó el proceso de elaboración de la cartografía a escala intermedia 1:100.000 para los 36 ecosistemas de páramo que se han identificado en el país.

Surgió entonces durante los primeros meses del año 2015 y a propósito de la discusión del proyecto de ley por medio del cual se buscaba aprobar el Plan Nacional de Desarrollo para el periodo 2014 - 2018, el debate respecto de si se debía optar por esperar a que estuviera lista la cartografía a escala 1:25.000 o si se debía adoptar temporalmente la cartografía a escala 1:100.000, a sabiendas que ante esta actuación pasarían varios años antes de que finalmente se adoptara la cartografía 1:25.000.

El punto central del debate era decidir respecto del nivel de precisión necesario en la cartografía que iba a ser el insumo esencial para tomar decisiones sobre las problemáticas ambientales relacionadas con los ecosistemas de páramo. Uno de los objetivos de este proceso de delimitación era prohibir la realización de actividades que significan impactos significativos para los páramos - principalmente actividades agropecuarias, mineras y de hidrocarburos -; aunque en principio esta pareciera ser una medida deseable teniendo en cuenta el carácter estratégico de los páramos dentro del ciclo de regulación hídrica, implicaba, entre otros, el cambio forzoso de la actividad económica de miles de campesinos - también un impacto ambiental de la prohibición - que, por ejemplo en el caso de los municipios de Vetás, Suratá y California en cercanías al páramo de Santurbán, exigían que se les reconociera su fuente de sustento y la tradición cultural de las actividades que han realizado durante varias generaciones. La inminente prohibición de estas actividades causó tal reacción que los campesinos se organizaron y empezaron a denominarse a sí mismos “desplazados ambientales”.

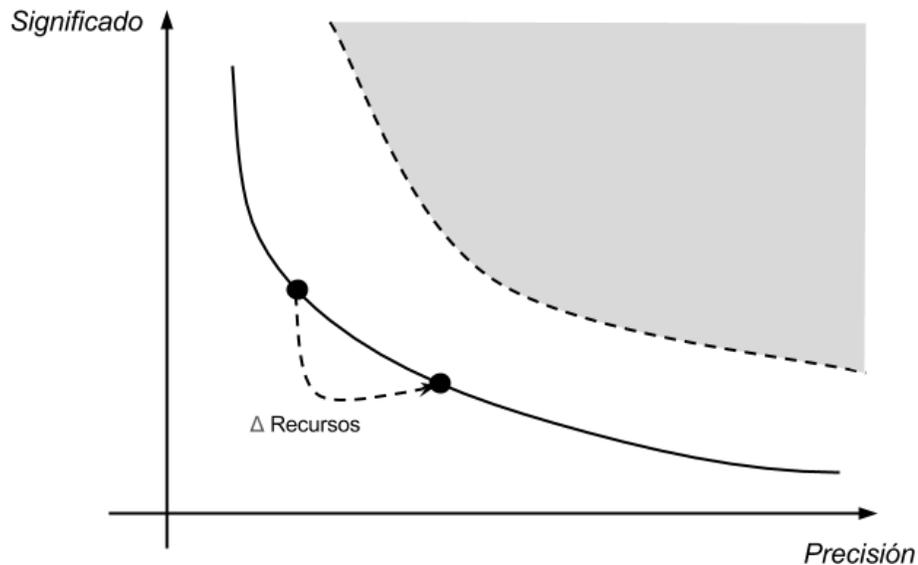
⁴⁷ Los datos expuestos fueron extraídos de respuestas a derechos de petición entregadas por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) entre los meses de noviembre de 2014 y marzo de 2015, en el marco de la realización de un debate de control político sobre minería en páramos realizado en la plenaria de la Cámara de Representantes de Colombia el día 22 de abril de 2015.

Apartándonos de la discusión ambiental, el punto que queremos resaltar es el siguiente. En principio, un mayor nivel de precisión en la cartografía existente para los ecosistemas de páramo se justifica en la medida que esta se requería para poder identificarlos y gestionarlos adecuadamente; evidencia de ello es que al pasar de cartografía a escala 1:250.000 a la cartografía 1:100.000 se identificaron dos ecosistemas de páramo que no aparecían en la cartografía inicial (páramos de Sonsón y Altiplano Cundiboyacense). Sin embargo, superado cierto umbral, alcanzar mayor precisión no pareciera tener importancia para las afirmaciones - y decisiones - respecto de las problemáticas ambientales evidenciadas. Sí, una escala más precisa permitiría identificar con mayor nivel de certeza el número de campesinos que habitan los ecosistemas de páramo pero, luego de cierto umbral, ¿realmente sirve este mayor nivel de precisión para la solución de las problemáticas ambientales? El principio de incompatibilidad planteado por Zadeh (1973) permite afirmar que no.

Por supuesto, este ejemplo permite plantear otra forma de ver el principio de incompatibilidad. Una afirmación en el sentido de conservar los páramos por su fragilidad y su función ecosistémica que careciera de cierto grado de precisión en términos de la identificación de los ecosistemas de páramo y del número de personas a quienes beneficiaría o perjudicaría dicha decisión tendría mucho significado (teórico al menos) pero carecería de elementos para lograr su aplicabilidad.

Otro elemento que salió a relucir en el debate acerca de la escala necesaria para la delimitación de los páramos en el país y que no hemos mencionado son los recursos que implicaba pasar de la cartografía 1:100.000 a la más detallada 1:25.000. En su momento, se planteaba una discusión costo/beneficio (no sólo en términos económicos) sobre la pertinencia de obligar a las entidades públicas a realizar el levantamiento de información en campo que permitiera la elaboración de la cartografía 1:25.000. Para ilustrar este aspecto permítanos referirnos al esquema mostrado en la figura 10.

Sin contar con soporte más allá de nuestras suposiciones razonables, proponemos este esquema para representar la aplicabilidad del principio de incompatibilidad expuesto por Zadeh (1973) al razonamiento sobre sistemas complejos. En el esquema, el área sombreada de gris representa la imposibilidad de realizar afirmaciones sobre sistemas complejos que gocen simultáneamente de una gran significancia y de un alto nivel de precisión; asimismo, se observa cierta relación de proporcionalidad inversa en la que, tratándose de sistemas complejos, un incremento en alguno de los dos parámetros conlleva una pérdida del otro.

Figura 10: Esquema explicativo del principio de incompatibilidad

Fuente: Elaboración propia

Queremos resaltar a partir del esquema que, además de una pérdida de significancia, la búsqueda de un nivel mayor de precisión implica la inversión de recursos que, dependiendo de la situación, pueden ser excesivos en comparación con el beneficio potencial de obtener mayor precisión. Precisamente, este era el último aspecto que buscábamos resaltar con el ejemplo de la discusión sobre la delimitación de los ecosistemas de páramo en el país.

Es en este orden de ideas - y con estos elementos de juicio - que proponemos la necesidad de abordar los fenómenos complejos utilizando de manera complementaria los paradigmas mecanicista y complejo. En palabras de Aristóteles, “una persona educada se distingue porque busca el grado de precisión que la naturaleza permite en cada tipo de cosas” (Ross, 2014, p. 9).

Hasta el momento, sin embargo, no hemos hecho mayor referencia a la pertinencia de dicho enfoque para abordar problemas ambientales y particularmente el de la predicción de impactos ambientales en el marco de un EIA. El remanente de este trabajo de investigación busca abordar los interrogantes relacionados.

2. La EIA vista desde la complejidad

2.1 El ambiente como un sistema complejo

El primer capítulo de este trabajo de investigación está dedicado a la construcción de un marco teórico que permita identificar fuentes de incertidumbre en el marco del modelamiento de un fenómeno complejo. De esta forma, hemos reservado intencionalmente para este capítulo el análisis de la pertinencia de dicho marco teórico para abordar problemáticas ambientales, particularmente el de la predicción de impactos ambientales realizados dentro de una EIA.

Corresponde iniciar, entonces, con justificar la pertinencia de hablar del comportamiento del ambiente, el fenómeno con el que trata la EIA, como un fenómeno complejo. En este sentido, el objetivo de esta sección es analizar e identificar aquellas características que permiten hablar del ambiente como un sistema complejo y de su comportamiento como un fenómeno también complejo, en los términos presentados en el capítulo anterior.

Conforme hemos reseñado las diferentes características que permiten caracterizar a un sistema como uno complejo (ver sección 1.4.1), hemos también expuesto algunos ejemplos de los muchos sistemas complejos que existen en la realidad en la que vivimos - nuestros cuerpos, nuestros sistemas inmunes o el conjunto de personas que se movilizan entre el trabajo y el hogar diariamente.

En su trabajo, Johnson (2007) proporciona numerosos ejemplos entre los que se encuentran las colecciones de personas que comercian en el mercado de acciones, las células humanas y los grupos de insurgentes; en estos casos, los fenómenos complejos asociados serían los colapsos de los mercados financieros, los tumores cancerígenos y las guerrillas. También resalta que existen muchos ejemplos más allá de la escala humana; tal es el caso de los electrones⁴⁸ que cuando se encuentran en colecciones lo suficientemente grandes se organizan y producen fenómenos emergentes que es extremadamente difícil, cuando no imposible, predecir, estudiando únicamente las propiedades de cada electrón por separado. "Aunque entendemos las propiedades de un electrón, los fenómenos emergentes correspondientes a una colección de electrones tienden a ser tan sorprendentes que cada uno representa un descubrimiento nuevo por sí solo" (p. 26). Ejemplos de estos fenómenos son la superconductividad, el efecto hall

⁴⁸ partículas cargadas negativamente que típicamente orbitan el núcleo de un átomo.

cuántico fraccional, la transición de fases cuánticas y el entrelazamiento cuántico, fenómeno que tuvo a Einstein desconcertado gran parte de su vida.

En relación con el concepto de “ambiente”, queremos resaltar la importancia de los planteamientos hechos en trabajos como el de Maya (1995) y Toro (2009) - este último relacionado con la EIA -, en donde los autores abordan el concepto de ambiente como el resultado de la interacción entre dos sistemas que ya hemos reseñado como complejos: los sistemas ecológicos - usualmente denominados “ecosistemas” - y los sistemas socio-culturales. A continuación profundizamos esta discusión.

Por un lado, encontramos los sistemas ecológicos⁴⁹ a los que Odum y Barret (2006) definen como unidades que comprenden organismos vivos en un área dada que están en interacción entre ellos y con su entorno físico, de manera que se da un flujo de energía entre ambos. Autores como Meadows (2009) reconocen repetidamente a los ecosistemas como sistemas complejos.

Por otro lado, encontramos otro gran grupo de sistemas complejos reconocidos por varios de los autores consultados y a los que usualmente se hace referencia como “sistemas sociales” o “sistemas socio-culturales”. Esta categoría acoge todos aquellos sistemas que emergen de la interacción de varios agentes sociales - seres humanos. Precisamente, Buckle Henning y Chen (2012) realizaron una revisión de varias publicaciones relacionadas con el estudio de sistemas complejos, encontrando que todos los autores consultados coinciden en reconocer que el único enfoque efectivo para tratar de entender el comportamiento humano es el que plantean los sistemas complejos.

A partir de esta diferenciación, vamos a analizar cada una de las características que previamente enunciábamos como propias de un sistema complejo, con miras a validar, en los términos de este trabajo de investigación, el concepto de “ambiente” expuesto por Maya (1995) y Toro (2009).

Conjunto de muchos elementos que interactúan

Debemos iniciar este análisis identificando aquellos elementos que conforman ese gran sistema complejo denominado ambiente y las relaciones que existen entre ellos y entre elementos que se encuentran fuera del sistema. El modelo de producción de bienes y servicios en el que se basa el sistema económico permite identificar fácilmente estos elementos y sus relaciones.

⁴⁹ Vale la pena recordar que algunos de los primeros aportes fundamentales para el estudio de sistemas complejos fueron el fruto del trabajo de un biólogo: Bertalanffy.

Aunque tan pronto como los seres humanos interactuamos con un ecosistema emerge automáticamente un nuevo sistema complejo – un socio-ecosistema, si se quiere -, pensar en los elementos de los dos sistemas iniciales por separado puede ayudar a establecer los elementos que componen este último.

Por un lado, encontramos a los seres humanos organizados de diversas maneras - entidades gubernamentales, sociedad civil, empresas privadas, entre otros - y, por otro, tenemos los diferentes elementos que componen los sistemas ecológicos - cuerpos de agua, especies de animales y plantas, depósitos de materiales, entre otros⁵⁰. Las relaciones entre estos elementos quedan establecidas, por ejemplo, por medio del aprovechamiento que los seres humanos realizamos de los diferentes recursos existentes en nuestro entorno natural y que utilizamos en nuestras actividades productivas - minerales para construcción, generación de energía eléctrica a partir de caídas de agua, etc. -, a la vez que usamos estos ecosistemas como sumideros de los desechos y desperdicios que generamos en este proceso de aprovechamiento.

Por supuesto, existen elementos que quedan por fuera de este sistema complejo, pero con los que los elementos al interior también tienen relación. Tal es el caso, por ejemplo, de las grandes cantidades de energía que provienen del sol y sin las que - o con exceso de ellas - las condiciones del planeta serían absolutamente diferentes⁵¹.

Sistema dinámico no lineal

En relación al dinamismo del sistema, un buen ejemplo es el proceso de calentamiento global que se ha venido manifestando en las últimas décadas y del que la comunidad científica en general ya ha reconocido que somos los responsables.

Considerando que dicho fenómeno se ha desencadenado gracias al aumento en la concentración de ciertas sustancias en la atmósfera denominadas Gases de Efecto Invernadero (GEI) - por ejemplo, dióxido de carbono y metano, entre otros -, podría

⁵⁰ Aunque la cuantificación precisa de todos estos elementos es una tarea muy dispendiosa (además de inútil de acuerdo al principio de incompatibilidad), es evidente que, dependiendo de las subcategorías en que se quiera agrupar estos elementos, pueden encontrarse tantos como se quiera.

⁵¹ Vale la pena resaltar el maravilloso hecho de que, junto a otras características como la composición de la atmósfera, la distancia a la que la tierra se encuentra del sol le permite recibir una cantidad de energía tal que ha posibilitado el desarrollo de vida en el planeta; ni muy cerca, ni muy lejos (Conkin, 2006).

pensarse que si detuviéramos los procesos por medio de los cuales se generan las emisiones de estos gases, pasaría lo mismo con el proceso de calentamiento. Sin embargo, gracias al dinamismo del sistema, en el sentido de que su estado futuro no sólo depende de su estado actual sino también de su estado pasado, estudios sugieren que aún si las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) se detuvieran repentinamente, la cantidad de este gas que ya se encuentra en la atmósfera podría seguir calentando el planeta por siglos (Frölicher, Winton & Sarmiento, 2014).

De hecho, el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) indicó en un informe publicado a finales del año 2013⁵² que, de acuerdo a las predicciones más confiables de las que disponemos, para evitar que la temperatura global promedio aumente por encima de los 2°C, es (o era en ese entonces) necesario aplicar medidas fuertes de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (el fracaso de la adopción del protocolo de Kyoto por parte de los países industrializados sugiere que este es un objetivo que no se va a alcanzar).

En relación con la no linealidad del sistema, basta con observar cualquiera de las gráficas incluidas en el reporte del IPCC que describen el comportamiento de las temperaturas globales en las últimas décadas y en las que se evidencia que, por ejemplo, su comportamiento no puede describirse mediante una relación matemática lineal.

Situaciones similares, tanto en el caso del dinamismo como el de la no linealidad, pueden argumentarse para otras facetas del comportamiento del ambiente, como lo pueden ser las tasas de deforestación, las prácticas pesqueras insostenibles o el agotamiento de depósitos de recursos naturales.

Auto-organización

Un buen ejemplo de la auto-organización que exhiben los elementos que conforman el sistema complejo ambiente es la forma como diferentes comunidades de seres humanos se han organizado a lo largo de la historia, en torno a la dotación particular de recursos de las zonas geográficas en las que se encuentran ubicados.

Evidencia de ello ha sido la facilidad que hemos encontrado en el país para generar energía eléctrica aprovechando las caídas de agua que existen gracias a nuestra geografía irregular, mientras que en los países bajos se han especializado en

⁵² Informe disponible en: <http://www.climatechange2013.org/report/review-drafts/>

técnicas como los molinos de viento y agua, que les permitan evitar que sus territorios se inunden.

Jerarquías

Aprovechando el hecho de que el sistema complejo ambiente esté compuesto por dos sub-sistemas a su vez complejos, planteamos como ejemplos de las jerarquías presentes las siguientes:

Figura 11: Ejemplos de jerarquías existentes en los sistemas complejos.

*Sistemas ecológicos: ... ⇔ célula ⇔ órgano ⇔ organismo ⇔ población
⇔ comunidad ⇔...*

*Sistemas socio – culturales: ... ⇔ Barrio ⇔ Localidad ⇔ Ciudad ⇔ Dpto.
⇔ Región ⇔...*

Fuente: Elaboración propia.

Propiedades emergentes

Permítanos partir de considerar el sistema climático. Es bien sabido que este sistema es el resultado de la interacción de muchos factores - las nubes, los casquetes de hielo en los polos, la radiación solar, los regímenes de viento, las corrientes oceánicas, el movimiento de precesión de la tierra, cambios en los ciclos solares, erupciones de grandes volcanes, quemadas masivas, el hueco en la capa de ozono, la deforestación, la emisión de gases de efecto invernadero, etc. - y que su entendimiento no se puede alcanzar sólo estudiando cada uno de estos factores por separado (Schmidt, 2014). Se habla entonces de que el sistema climático es un sistema complejo y su comportamiento es emergente.

Considere ahora la gran dependencia que existe entre las actividades humanas a nivel local, regional y global y el comportamiento del sistema climático. Recuerde, por ejemplo, las grandes afectaciones que sufrieron las prácticas agrícolas de muchos campesinos debido a la ola de calor que trajo a varias zonas del país el fenómeno de El Niño durante el año 2014 (esta fue la misma ola de calor que dejó miles de chigüiros muertos en Casanare). En este sentido, podemos argumentar

que el comportamiento del ambiente también es emergente y depende de la interacción de factores ecológicos y socio-culturales.

Resiliencia

Un ejemplo de la existencia y pérdida de esta propiedad son las inundaciones que se vivieron en diferentes zonas del país durante la ola invernal que registramos entre los años 2010 y 2011. En el caso de Bogotá, esta experiencia tuvo como consecuencia la inundación de varias zonas en las que se han construido viviendas y otro tipo de edificaciones durante los últimos años, pero que anteriormente correspondían a zonas de humedales y rondas de cuerpos de agua; su afectación terminó en la pérdida de resiliencia de estos ecosistemas potencialmente inundables en época de lluvias y, por ende, en la inundación descontrolada de dichas zonas.

A una escala nacional, la severidad de esta temporada de lluvias y la reducida capacidad de regulación de ecosistemas como los humedales se sumaron para generar una emergencia que ameritó la venta de un porcentaje de la empresa estatal Ecopetrol con el objetivo de dotar al gobierno de liquidez financiera para atender la emergencia.

Stocks limitados de recursos

Autores como Fox (2007) han dedicado investigaciones juiciosas a señalar que la dotación de recursos naturales disponible en el planeta es limitada; en este sentido, advierten lo inadecuado de promover el funcionamiento de un modelo económico que asume una disposición infinita de materias primas.

Un buen ejemplo acerca de la presencia de dichos stocks al hablar del sistema ambiente es la gran polémica que se ha venido dando desde las últimas décadas en relación al modelo de producción energética mundial; es decir, la forma a partir de la cual transformamos la energía que usamos en las diferentes actividades que realizamos. Sin importar qué tantos yacimientos de combustibles fósiles se descubran, se sabe que los yacimientos de estos combustibles son finitos y eventualmente se agotarán (nadie está creando nuevos pozos de petróleo); por

supuesto no hay un consenso al respecto, pero algunas estimaciones sugieren que las reservas mundiales llegarán a su fin hacia el año 2065⁵³.

En respuesta, las denominadas “energías renovables” han venido ganando una gran cantidad de defensores, argumentando que se trata de energías “más limpias” - en el sentido de que no generan emisiones de gases de efecto invernadero - y que se basan en la utilización de recursos naturales que no se agotan: la luz solar, las corrientes de viento, las mareas o las caídas de agua. Sin embargo, autores como Bryce (2011) ya han resaltado, refiriéndose a los biocombustibles y las energías eólica y solar, algunas limitaciones técnicas⁵⁴ que hacen que dichas fuentes de energía resulten limitadas en la práctica.

Esta misma situación puede equipararse, por ejemplo, con la cantidad de desechos que soporta un cuerpo de agua como el río Bogotá (otro stock limitado) o la cantidad de partículas contaminantes que puede soportar la atmósfera en determinada ubicación geográfica (otro stock limitado).

Gracias a todos los ejemplos citados previamente, es posible argumentar que el ambiente es un sistema complejo que resulta de la interacción de dos, a su vez, sistemas complejos “más pequeños”: los sistemas ecológicos y los socio-culturales.

En este mismo sentido, Baranger (2000) ha reconocido que, a pesar de que no existe un consenso generalizado acerca de lo que es un sistema complejo, en el campo científico se acepta que los sistemas complejos ideales tienden a ser los biológicos y aquellos que involucran seres humanos: nuestras comunidades, nuestras sociedades, nuestra cultura y, aunque cabe más en la categoría biológica, nuestros cuerpos.

Vale la pena reconocer que la EIA no es ajena a este planteamiento. Precisamente, es usual que, en la etapa de identificación de impactos ambientales, se clasifiquen los diferentes factores ambientales en dos grandes categorías haciendo referencia al concepto de ambiente previamente descrito: los factores físico-bióticos y los socio-culturales. En este sentido, consideramos válidos (y necesarios) los aportes que se puedan hacer aplicando el paradigma científico planteado por la Teoría de la

⁵³ Estimaciones obtenidas de: <http://www.bp.com/en/global/corporate/about-bp/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/review-by-energy-type/oil/oil-reserves.html>

⁵⁴ Bryce (2011) se ha referido a la densidad de potencia asociada con cada fuente de energía; este concepto hace referencia al flujo de energía que puede obtenerse a partir de cierta unidad de volumen, área, o masa de cierta materia prima. Señala el autor que al ser bastante mayores las densidades de potencia asociadas a los combustibles fósiles convencionales que aquellas asociadas a las energías eólica y solar, son necesarios muchos más recursos - espacio, extensión de las líneas de transmisión, etc. - para obtener la misma cantidad de energía a partir de estas últimas.

Complejidad al diseño y/o mejoramiento de metodologías aplicadas al proceso de EIA y particularmente a la identificación y valoración de impactos ambientales.

Aceptando entonces que el ambiente es un sistema complejo y su comportamiento un fenómeno también complejo, en la próxima sección analizamos la EIA a partir de las diferentes fuentes de incertidumbre que identificamos en el primer capítulo.

2.2 Fuentes de incertidumbre en la EIA

Esta sección parte de reconocer que, gracias a los ejemplos expuestos en la sección inmediatamente anterior, es posible hablar del ambiente como un sistema complejo que surge de la interacción de los sistemas ecológicos y los socio-culturales. Esto implica que las diferentes fuentes de incertidumbre que identificamos previamente a la hora de modelar y predecir el comportamiento de sistemas complejos también son aplicables al ambiente.

Teniendo en cuenta que ya hemos caracterizado la EIA⁵⁵ como un ejercicio en el que se realizan predicciones acerca del comportamiento del ambiente, el objetivo de esta sección es el de ilustrar aquellos momentos, condiciones o factores por medio de los cuales se pueden manifestar estas fuentes de incertidumbre a lo largo del proceso. Para ello, conviene, partiendo de la definición adoptada previamente (ver sección 1.2), especificar las etapas y actividades que lo componen.

Fruto de revisar otros trabajos de investigación⁵⁶, la normativa vigente para el proceso de licenciamiento ambiental en Colombia⁵⁷, los resultados de una consultoría⁵⁸ contratada por el Departamento Nacional de Planeación (DNP) con el objetivo de evaluar el proceso en el país y de articular este conocimiento con el de expertos en la materia y con la experiencia propia, es posible estructurar el proceso de EIA en tres etapas principales

⁵⁵ Vale la pena recordar que Toro (2009) define la EIA como un proceso jurídico-administrativo que tiene por objetivo la toma de decisiones respecto de proyectos, obras o actividades que puedan generar impactos ambientales significativos.

⁵⁶ Recomendamos los trabajos de Duarte (2000), Toro (2009), Toro, Requena y Zamorano (2010) y Martínez (2013).

⁵⁷ Decreto 1076 de 2015 y el Plan Nacional de Desarrollo 2014 - 2018 (Ley 1753 de 2015).

⁵⁸ Informe publicado por el Departamento Nacional de Planeación (DNP) en 2013 y realizado por la Fundación Natura y la firma SEI S.A.

que se describen a continuación y que se esquematizan en las figuras 12 y 13, junto a las principales actividades en las que, a su vez, se pueden descomponer⁵⁹.

De manera general, el proceso puede dividirse en tres grandes etapas: Planeación, Evaluación y Seguimiento y Control. Aunque, como lo señala DNP (2013), la etapa de Planeación comprende diferentes actividades, la única que de momento se encuentra formalizada en el país es la elaboración y evaluación de un estudio ambiental denominado Diagnóstico Ambiental de Alternativas (DAA), que tiene por objetivo la formulación de alternativas para la realización de determinado proyecto y la selección de aquella que permita minimizar los potenciales impactos ambientales que se puedan generar. Es importante mencionar que esta etapa sólo aplica, a discreción de la autoridad ambiental, para algunos de los proyectos contenidos en la lista taxativa contenida en el artículo 2.2.2.3.4.2 del Decreto Único del Sector Ambiente (MADS, 2015).

Por su parte, la etapa de Evaluación tiene por objetivo decidir sobre el otorgamiento o no de una licencia ambiental para un proyecto con base en la evaluación de los potenciales impactos que se puedan generar; para ello se basa en la elaboración y evaluación de un Estudio de Impacto Ambiental (EslA). Precisamente, es durante la elaboración de este estudio ambiental que se realizan las predicciones de los potenciales impactos ambientales que pueda generar el proyecto, razón por la que vale la pena definir con un poco más de detalle el proceso de su elaboración.

Según la normativa colombiana, un Estudio de Impacto Ambiental (EslA) se define como el conjunto de información que debe presentar ante la autoridad ambiental competente el interesado en el otorgamiento de una licencia ambiental. En este sentido, debe contener información sobre la localización del proyecto, los elementos abióticos, bióticos, y socioeconómicos del medio que puedan sufrir deterioro por la respectiva obra o actividad para cuya ejecución se pide la licencia, la evaluación de los impactos que puedan producirse y el diseño de los planes de prevención, mitigación, corrección y compensación de impactos que constituyen el plan de manejo ambiental de la obra o actividad (Presidencia de la República, 2015).

Su proceso de elaboración inicia con la generación de una línea base del área de influencia definida para el proyecto. Dicha línea base no es otra cosa que una descripción lingüística que suele ir acompañada de algunos datos, gráficos y tablas y que es el resultado de levantar información primaria en el área de influencia y de consultar otras fuentes de información secundaria de interés.

A partir de esta descripción y gracias a la experiencia de los encargados de elaborar el EslA, procede la identificación de aquellos factores ambientales susceptibles de ser afectados por el proyecto, tomando como base listas de chequeos previamente

⁵⁹ Como lo ha mencionado Toro (2009), vale la pena recordar que en Colombia se le denomina “licenciamiento ambiental” al proceso que internacionalmente se conoce como Evaluación de Impacto Ambiental.

propuestas por expertos en el campo. Posteriormente, corresponde descomponer el proyecto en las diferentes actividades que deberán llevarse a cabo al momento de su materialización.

Con estos dos insumos, se realiza la identificación de impactos ambientales que es el resultado de analizar la afectación que sufrirá cada factor ambiental seleccionado por cuenta de cada una de las actividades en las que se descompuso previamente el proyecto. Una vez identificados estos impactos, se procede a su valoración por medio del cálculo de un indicador cuantitativo denominado *importancia del impacto*. Para ello se suele emplear el método de valoración cualitativa⁶⁰ adaptado por Conesa a la legislación española⁶¹, utilizando como apoyo programas de computador especializados en el procesamiento de hojas de cálculo para elaborar matrices de doble entrada que faciliten el análisis de estos cruces.

En este punto vale la pena mencionar que, a pesar de que Duarte (2000) señala actividades adicionales relacionadas con algunos análisis agregados de las importancias de los impactos (actividades señaladas mediante líneas punteadas rojas en la Figura 13), en Colombia estas actividades no se realizan y, por el contrario, la valoración de los impactos ambientales uno a uno da lugar a que se proceda con la elaboración del correspondiente Plan de Manejo Ambiental (PMA). Este plan es el conjunto de medidas y actividades que surgen de una evaluación de los impactos ambientales y que están orientadas a prevenir, mitigar, corregir o compensar los impactos y efectos ambientales que se puedan generar (MADS, 2015).

Finalizado el EsIA correspondiente, este es presentado por el proponente del proyecto a la autoridad ambiental competente que será la encargada de decidir sobre el otorgamiento o no de la licencia ambiental solicitada. De ser otorgada, corresponde la ejecución de la última etapa del proceso de EIA: la de Seguimiento y Control.

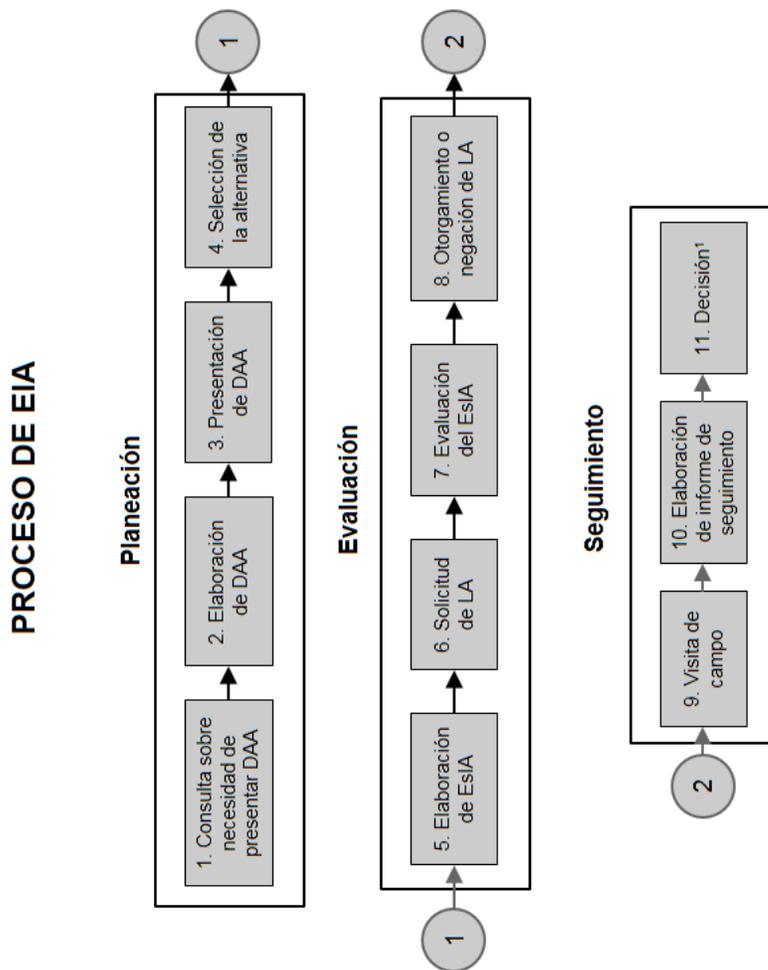
A lo largo de esta etapa, la autoridad ambiental que otorgó la licencia tendrá la obligación de realizar visitas de campo al área de influencia del proyecto con los objetivos de verificar la eficiencia y eficacia de las medidas de manejo implementadas, corroborar el comportamiento de los medios bióticos, abióticos y socioeconómicos y verificar el cumplimiento de la normatividad ambiental aplicable al proyecto, entre otros (MADS, 2015). Como resultado, la autoridad ambiental puede modificar o ajustar el correspondiente Plan de Manejo Ambiental e incluso iniciar procesos sancionatorios por algún incumplimiento que identifique.

⁶⁰ Razón por la que se suele denominar metodología cualitativa a esta forma de evaluación de impactos ambientales.

⁶¹ Esta adaptación se encuentra suficientemente bien reseñada en el trabajo de Duarte (2000).

A partir de esta estructuración del proceso de EIA, a continuación procedemos a ilustrar mediante ejemplos los diferentes momentos y formas a lo largo del proceso en los que se pueden manifestar las fuentes de incertidumbre que identificamos previamente y que pueden influir en el grado de precisión de las predicciones que se hagan en el marco de una EIA. Para esta labor, abordamos, en su orden, las tres categorías en las que agrupamos las fuentes de incertidumbre: aquellas fuentes de incertidumbre relacionadas con el fenómeno que se está modelando - i.e. el ambiente -, seguidas de aquellas que tienen que ver con la utilización de los modelos que se elaboren y, finalmente, las que se presentan en la información que utilizamos para describir una situación (ver sección 1.5).

Figura 12: Diagrama descriptivo del proceso de EIA



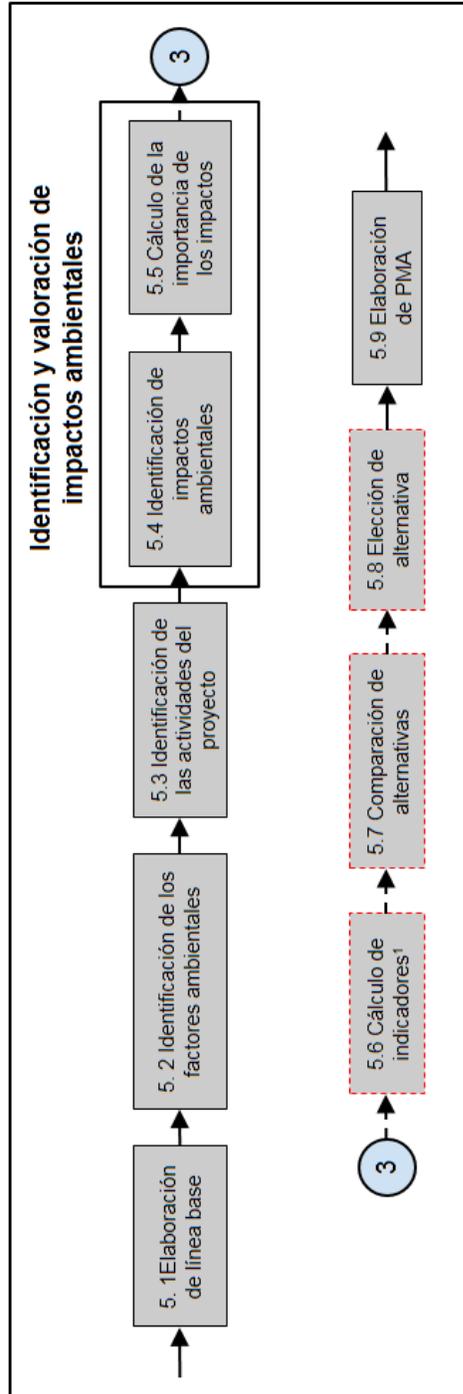
¹ Posibles medidas a tomar como resultado de la etapa de Seguimiento:
 - Modificación o ajuste del PMA
 - Inicio de procesos sancionatorios

Fuente: Elaboración propia.

Figura 13: Diagrama descriptivo del proceso de elaboración de un EsIA

PROCESO DE ELABORACIÓN DE ESIA

Elaboración de EsIA:



¹Indicadores a calcular:

- Importancia total de los impactos por cada acción
- Importancia total ponderada de los impactos por cada acción
- Importancia total de los impactos a cada factor ambiental
- Importancia total ponderada de los impactos a cada factor ambiental
- Importancia total de todos los impactos
- Importancia total ponderada de todos los impactos

Fuente: Elaboración propia.

Fuentes de incertidumbre respecto al fenómeno que se está modelando

1. Fenómenos aleatorios

Como ya hemos explicado, al considerar el modelamiento de un sistema complejo como el ambiente se debe partir de aceptar cierto componente de aleatoriedad que, al menos con el estado actual de nuestro conocimiento, se resiste a ser modelado de manera precisa.

Farber (2003) ilustra este punto citando el siguiente ejemplo. Aunque podría pensarse que agregar especímenes de cierto predador en un ecosistema debería tener efectos negativos sobre la población de la especie de la que se alimenta el predador, experimentos han demostrado que, gracias a las conexiones indirectas existentes en las redes alimenticias, agregar individuos de la especie predadora puede, de hecho, incrementar el número de presas. De esta forma, gracias al gran número de interconexiones entre especies, calcular todos los efectos de añadirlas o removerlas puede resultar imposible.

En el marco de una EIA, este punto puede ilustrarse con la siguiente situación. Considere la tarea de identificar los potenciales impactos ambientales que pueda generar la construcción de una carretera que fracciona cierto ecosistema; en este escenario, el componente de azar puede estar representado, por ejemplo, en el número de muertes de animales que se generarán como resultado de la coincidencia entre animales que intentan atravesar la carretera y automóviles que la usan simultáneamente.

En otras palabras, ¿cómo modelar de manera precisa cuántos animales resultarían afectados al intentar atravesar la carretera (una carretera que aún no existe)?, ¿qué implicaciones tendría la pérdida de un número desconocido de individuos sobre el resto del ecosistema? Quizás una aproximación incluya estimaciones sobre la cantidad de conductores que demandan la carretera, pero ¿cómo modelar el comportamiento de la fauna del ecosistema ante una perturbación que aún no existe?

Aunque este ejemplo se refiere explícitamente a la actividad de valoración de impactos ambientales, esta fuente de incertidumbre está presente a lo largo de todo el proceso de EIA. Prueba de ello es el desistimiento a finales del año 2012 por parte de la empresa Cerrejón de la propuesta de desvío de un tramo del río Ranchería en el departamento de la Guajira, como consecuencia de la caída en los precios del carbón. ¿Cómo hubiera podido prever la empresa el comportamiento del sistema económico y sus implicaciones sobre el proyecto?

2. Falta de correspondencia de los modelos con las características del sistema

En el primer capítulo de este trabajo reseñamos la forma en que, gracias al mecanicismo, hemos aprendido a elaborar modelos adecuados - principalmente matemáticos - de fenómenos no complejos. Asimismo, presentamos algunos ejemplos de modelos que han pretendido abordar fenómenos con algún nivel de complejidad obteniendo resultados satisfactorios (al menos más satisfactorios de los que se podría obtener aplicando el mecanicismo).

Sin embargo y pese a todos los avances que se han producido en relación al modelamiento de fenómenos complejos, aún se evidencia un bajo nivel de correspondencia entre los modelos usualmente utilizados dentro de los procesos de EIA y las características de un sistema complejo - su objeto de modelamiento. Ejemplo de ello es la representación que se hace del área de influencia que se planea intervenir con la implementación de un proyecto; dicha representación, usualmente denominada *línea base*, es un modelo lingüístico acompañado de algunos datos, tablas y gráficas al que, sin embargo, escapan características básicas de los sistemas complejos, como el gran número de relaciones simultáneas que existen entre los diferentes elementos que lo componen y también entre estos y otros que se encuentran fuera de él.

Por supuesto, aunque el ejemplo hace referencia únicamente a la actividad de elaboración de la línea base para cierto EslA, esta fuente de incertidumbre afectará a cualquier actividad del proceso que utilice este primer modelo - u otros que se elaboren del ambiente - como insumo fundamental. De esta forma, un línea base que no cumpla el objetivo de representar adecuadamente el ambiente comprometerá el nivel de utilidad de las predicciones que se hagan posteriormente.

3. Sensibilidad a los parámetros del modelo

En primer lugar, vale la pena resaltar que esta fuente de incertidumbre se manifiesta únicamente cuando se cuenta con un modelo matemático que describa suficientemente bien el sistema complejo de interés y su posible comportamiento caótico correspondiente. Teniendo en cuenta que aún no contamos con un modelo semejante para describir al sistema ambiente, a modo de ilustración haremos una analogía tomando el modelo matemático propuesto por Conesa para el cálculo de la importancia de los impactos ambientales⁶².

⁶² Una descripción detallada de este modelo matemático y de sus atributos se puede encontrar en el trabajo de Toro (2009).

En este caso, los factores multiplicativos que acompañan algunos atributos corresponden a los parámetros que, de sufrir ligeras variaciones, podrían afectar sustancialmente la predicción hecha con el modelo. Aunque esta ecuación es demasiado simple para representar la forma en que un proyecto impacta cierto factor ambiental, algunos de los modelos matemáticos en los que se basan los análisis y valoraciones plasmados en la ecuación propuesta por Conesa sí pueden ser susceptibles a esta fuente de incertidumbre.

Considere, una vez más, el caso de la ecuación logística con sus múltiples aplicaciones y los modelos matemáticos utilizados para predecir el comportamiento del sistema meteorológico. Así como este modelo podría usarse para realizar análisis en los que se basen las valoraciones incluidas en ecuación de cálculo de importancia de ciertos impactos ambientales, esta fuente de incertidumbre afecta todas aquellas actividades basadas en modelos matemáticos que se usen a lo largo del proceso y que tengan por objetivo la representación de un fenómeno complejo.

Fuentes de incertidumbre al momento de usar el modelo

4. Contexto en el que se usa el modelo

Cuando se habla de modelos construidos para representar fenómenos no complejos pareciera ser una característica común que dichos modelos puedan usarse en situaciones diferentes sin que esto implique realizar modificaciones estructurales en su formulación. Piense en la ecuación para calcular el tiempo que toma desplazarse entre dos puntos; si bien la información que se le debe suministrar al modelo varía dependiendo de la situación en la que se use - velocidad a la que puede ocurrir el desplazamiento en una carretera seca en comparación con desplazarse en una carretera mojada -, la estructura general de la ecuación no cambia en función de los puntos entre los que se quiera simular el desplazamiento.

Por el contrario, cuando se trata con fenómenos complejos la estructura de los modelos utilizados sí depende de la situación en la que se utilice el modelo. En el marco de una EIA, esto quiere decir que, dependiendo de las particularidades de la región en la que se pretenda desarrollar un proyecto, muy probablemente sea necesario adaptar el modelo que se use para realizar la identificación y valoración de impactos ambientales.

Piense en la evaluación del impacto ambiental que ocasionaría una misma actividad - la construcción de unos campamentos en un área restringida, por ejemplo - en dos contextos diferentes. Por un lado, considere la realización de esta actividad en un área que, aunque reducida, se encuentre dentro de cierta área ecológica de especial importancia. De manera análoga, considere ahora su

realización en un entorno con características distintas y con un nivel de fragilidad mucho menor.

Resulta evidente que el modelo que se utilice para valorar los potenciales impactos a generar debe adaptarse dependiendo del contexto en el que se pretenda realizar la intervención para, por ejemplo, destacar en el primer escenario aquellos atributos – bien sea por la calificación otorgada al atributo mismo o por la ponderación que se le dé – que permitan reflejar la importancia de los impactos a pesar de que el área a intervenir sea reducida.

5. Valoraciones cuantitativas y cualitativas

Ya hemos reseñado el dilema que plantea el hecho de que las valoraciones que hagamos los seres humanos sean inherentemente cualitativas pero que, gracias a la utilidad que representa, nos hayamos acostumbrado a trabajar en términos cuantitativos. En este sentido, el uso de la metodología cualitativa para valoración de impactos ambientales plantea el uso de algunas tablas de equivalencia para realizar “traducciones” entre valoraciones cuantitativas y cualitativas y viceversa⁶³. Sin embargo, esta propuesta no resuelve algunas dificultades.

Dicha propuesta, a diferencia del fenómeno que pretende modelar, no incorpora métodos para el tratamiento simultáneo de información cualitativa y cuantitativa. Piense en la simultaneidad de las siguientes valoraciones dentro de un proceso de EIA que se ilustra mediante la siguiente situación. Aunque en principio podría pensarse que podría resultar una tarea sencilla establecer un indicador cuantitativo, por ejemplo, para la extensión de cierto impacto ambiental - área del área de influencia directa del proyecto -, surgen dificultades cuando se trata de asignarle una variable lingüística a este indicador. ¿A partir de qué tamaño de área se puede considerar que el impacto deja de ser “parcial” para convertirse en uno “parcial”?

Aunque para algunas aplicaciones puede resultar elemental trabajar con las tablas de equivalencia propuestas por la metodología cualitativa, no sucede así cuando se trata con fenómenos complejos. Considere, por ejemplo, construir una tabla de equivalencias o algún método de conversión entre el nivel de decibeles que va a generar la operación de cierto proyecto y la magnitud del impacto que se generaría sobre las especies de animales o sobre las personas que habitan las áreas cercanas ¿a partir de cuántos decibeles puede considerarse que la afectación es “alta”?

⁶³ Ver Tabla 14 del trabajo de Toro (2009).

Este problema es también una de las grandes dificultades que afronta la valoración económica de impactos. De la misma forma que con el ejemplo anterior, trate de imaginar cómo podría construirse una tabla de equivalencias o un modelo de conversión entre los grados de bienestar que represente una reserva forestal para cierta comunidad de personas que vivan cerca a ella y el correspondiente valor monetario por el que habría que compensarlas en el escenario en que se quiera transformar la reserva.

El hecho de que no se incorporen métodos para el tratamiento simultáneo de ambos tipos de valoración hace que se pierda significado en el proceso de conversión entre un tipo de valoración y el otro.

Aunque tomamos como ejemplo la valoración de impactos ambientales resulta evidente que esta fuente de incertidumbre bien puede aplicarse a cualquier actividad dentro del proceso de EIA que implique tomar decisiones a partir de ambos tipos de información; por ejemplo, la decisión por parte de la autoridad ambiental sobre si se otorga o no una licencia ambiental solicitada.

6. Subjetividad

Ya hemos reseñado el hecho de que inconscientemente los seres humanos realicemos abstracciones mentales diferentes y, por ende, valoraciones diferentes incluso cuando se trata de objetos idénticos. La identificación y valoración de impactos no escapa a esta subjetividad.

En este sentido, un ejercicio que hemos realizado de manera informal y que ilustra muy bien esta fuente de incertidumbre es solicitar a personas con perfiles académicos diferentes que realicen la valoración de cierto impacto ambiental. La valoración obtenida, lejos de ser la misma, tiende a estar relacionada con el nivel de conocimiento y preocupación de cada persona por las cuestiones ambientales.

El lector puede imaginar esta situación al pensar hacia qué postura tenderían inconscientemente las posiciones del equipo encargado de elaborar el EsIA, la del proponente del proyecto y la del equipo encargado de evaluar el estudio en la autoridad ambiental competente. No es descabellado anticipar que la postura de cada actor muy probablemente diferirá de las de los demás.

Por supuesto, esta fuente de incertidumbre puede manifestarse en cualquier momento del proceso de EIA en el que se requiera realizar cierta valoración como antesala a la toma de una decisión.

7. Intencionalidad

A diferencia de la situación anterior, bien puede presentarse el caso en el que la valoración de los impactos ambientales se realice obedeciendo de manera consciente a cierto interés particular.

Teniendo en cuenta que existe cierta relación de proporcionalidad directa entre la calificación de un impacto y el costo de las correspondientes medidas de manejo ambiental, no sorprendería que cierto proponente de un proyecto buscara, en aras de reducir los costos asociados al proyecto, disminuir intencionalmente la calificación de los impactos identificados. Ésta bien podría ser una conclusión de los hallazgos de Martínez (2013), en donde se evidencia un grado alto de manipulación aparentemente arbitraria de los atributos utilizados para la valoración de los impactos ambientales y de los rangos en los que se clasifican estos impactos.

Asimismo, llama la atención que este tipo de valoración intencionada se genere también al interior de las autoridades ambientales. Tal es el caso del proceso de evaluación de la solicitud de la licencia ambiental para el proyecto hidroeléctrico Porvenir II que, según denuncias hechas en medios de comunicación^{64 65}, fue otorgada en contravía del concepto técnico elaborado por los profesionales de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA).

El escenario para que se den este tipo de situaciones en relación con el proceso de EIA, pareciera haber sido preparado por el documento Conpes 3762 de 2013 en el que se establece que los permisos y trámites ambientales - incluidas las licencias ambientales - son una de las principales dificultades que afectan la agilidad y viabilidad del desarrollo de los proyectos de infraestructura, hidrocarburos, minería y energía.

Una vez más y al igual que el caso anterior, esta fuente de incertidumbre bien puede manifestarse en cualquier actividad del proceso de EIA que involucre la toma de una decisión.

8. Sensibilidad a las condiciones iniciales

De manera similar a como sucede con la sensibilidad del modelo a sus parámetros, en esta ocasión tampoco se tiene un modelo matemático que represente lo suficientemente bien el sistema ambiente como para que sea

⁶⁴ <http://www.elespectador.com/opinion/plan-de-depredacion-ambiental-columna-545392>
<http://www.elespectador.com/opinion/obras-de-4g-patadas>

⁶⁵ <http://www.bluradio.com/119592/que-tanto-porvenir-tenemos-con-los-proyectos-hidroelectricos>

fácilmente identificable el impacto sobre las predicciones hechas al cambiar ligeramente la información suministrada al modelo.

Tomando nuevamente como ejemplo la ecuación logística o los modelos matemáticos utilizados para analizar el comportamiento del sistema meteorológico, la diferencia con la sensibilidad a los parámetros del modelo radica en que en este caso el modelo presenta sensibilidad a la información que se le suministra. En el caso en que se utilice alguno de estos modelos para informar el juicio de los expertos encargados de valorar el impacto ambiental, la predicción hecha podría verse drásticamente afectada por ligeros cambios en la información suministrada al modelo como, por ejemplo, el número de especímenes de flora y fauna existentes en el área de influencia del proyecto.

De esta forma, esta fuente de incertidumbre también es aplicable a todas aquellas actividades que involucren el diseño, elaboración, adaptación o utilización de modelos matemáticos para valorar impactos ambientales.

Fuentes de incertidumbre relacionadas con imperfecciones de la información

9. Información errónea

Tal y como comentamos anteriormente, este tipo de imperfección suele presentarse cuando se tienen varias representaciones del mismo aspecto o fenómeno del mundo real. A la hora de realizar un proceso de EIA, este tipo de imperfección suele presentarse cuando se trata de consolidar información proveniente de fuentes diferentes.

Un ejemplo puntual se desprende de la ausencia de un sistema unificado que centralice la información referente a las consultas previas que se han realizado en el país. Según han advertido la Confederación Nacional de Organizaciones Afrocolombianas (CNOA) y la Organización Nacional Indígena de Colombia (ONIC) (2011 citados en DNP, 2013), existen bases de datos tanto en el Ministerio del Interior como en el hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) con “información distinta”.

Estas bases de datos pueden tomarse como insumos para proponer cierto proyecto en el que erróneamente se identifiquen - o no - comunidades étnicas en el área de influencia establecida. La corrección tardía de esta información puede generar retrasos, sobrecostos e incluso puede ser un factor decisivo para la realización o no del proyecto.

Resulta evidente que este tipo de incertidumbre bien puede manifestarse en cualquier actividad dentro del proceso de EIA en la que se utilice información secundaria como insumo para la toma de una decisión.

10. Información imprecisa

Como comentamos previamente, existen varias formas en las que se puede manifestar la información imprecisa.

En el caso de la vaguedad, contemple el ejercicio de levantamiento y construcción de la línea base que servirá de insumo para el proceso de identificación y valoración de impactos. Durante esta actividad, es usual que los profesionales encargados de realizar tal descripción incluyan afirmaciones como “la población presenta niveles aceptables de bienestar” o “el proyecto puede significar mejoras en la calidad de vida de la comunidad”.

Aunque este tipo de descripciones transmiten una idea general del conocimiento que la persona tiene respecto a la situación, no son lo suficientemente detalladas y suelen perder significado más allá de la persona encargada de la recolección de la información. En estas situaciones, es posible hablar de información vaga usada como insumo para la elaboración de un EslA.

En relación con la ambigüedad, Martínez (2013) ya ha llamado la atención acerca de la utilización errónea de un mismo nombre para describir dos atributos diferentes y acerca de la utilización de atributos con nombres diferentes para referirse a la misma característica. En el primer caso, señala el autor, suele usarse el atributo “tipo” tanto para calificar el impacto como positivo o negativo a la vez que se utiliza para describirlo como directo o indirecto; por su parte, los atributos extensión (EX) y cobertura (CO) se usan indistintamente para caracterizar el tamaño del área afectada por el proyecto.

Por último, las imperfecciones relacionadas con información sesgada pueden aplicar a cualquiera de las formas de recolectar información para la elaboración de un EslA. Considere cierta falla en la calibración que tenga algún instrumento que se utilice para realizar mediciones de diferentes factores ambientales; esta mala calibración de los instrumentos de medición se traduce en un sesgo sistemático que se propaga a lo largo del proceso. Esta misma dificultad puede presentarse al aplicar ciertas técnicas sociales para la recopilación de información que, gracias al sesgo inherente de la persona que las aplica, privilegien únicamente la recopilación de cierto tipo de información.

11. Información incierta

Vale la pena mencionar que al hablar de este tipo de imperfección usamos el concepto de incertidumbre en el sentido de que existe una diferencia entre la información de la que disponemos para realizar cierta descripción y una información *verdadera* que es consecuencia de un estado de conocimiento absoluto.

A pesar de la gran extensión que puede alcanzar un EsIA, es razonable suponer que la cantidad de información que se revisó y sintetizó es varias veces más extensa al estudio que se obtiene como resultado. Sin embargo, aún si se realiza una revisión juiciosa de toda la información recolectada, es una actitud poco humilde y para nada realista pensar que se revisó siquiera un porcentaje cercano al 100% de todo el conocimiento que la humanidad ha generado en relación con cierto tema en particular; por ejemplo, con la caracterización de cierto impacto ambiental. Podemos hablar entonces de un componente de incertidumbre interna presente en las descripciones que hagamos.

Por otro lado, aún en el hipotético escenario en que se lograra conocer todo el conocimiento que la humanidad ha generado en relación a cierta materia, existe una fracción que, al menos con el desarrollo actual de la ciencia, nos resulta elusivo. Considere, por ejemplo, la hazaña que implica la comprensión absoluta del sistema climático terrestre o el hecho de que aún hoy en el año 2015 sigamos descubriendo nuevos planetas en el universo⁶⁶. Hablamos entonces de que existe un nivel de incertidumbre externa en las descripciones que elaboramos.

Agotada la ilustración de las formas y momentos en que se pueden manifestar las diferentes fuentes de incertidumbre identificadas en el proceso de EIA, es posible resaltar la importancia de incorporar el concepto de incertidumbre dentro de esta herramienta de carácter predictivo, con miras a realizar predicciones más útiles de los impactos ambientales que genere cierto proyecto. El interrogante a cuya respuesta nos resta aportar es el cómo; las siguientes secciones buscan aportar elementos en este sentido.

Cuando se habla del concepto de incertidumbre relacionado con cuestiones ambientales, con mucha frecuencia se suele citar al *Principio de Precaución* como una máxima que debe orientar la forma de actuar y de tomar decisiones - el cómo. La próxima sección aborda este principio y analiza los desarrollos conceptuales que se han realizado aplicándolos al caso de la EIA.

⁶⁶ http://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/08/150825_ciencia_joven_chilena_descubre_nuevo_planeta_bd

2.3 Los principios de prevención y precaución y la EIA

Contrario a lo que esperaba el común denominador de los científicos a principios del siglo XX, el desarrollo científico y tecnológico no ha traído consigo más certidumbre en todas las áreas del conocimiento. De hecho, han sido estos avances los que han permitido identificar fuentes de incertidumbre que, en algunos casos, resultan irreducibles. Algunas de estas incertidumbres se hacen evidentes cuando se trata de responder preguntas como ¿quién contraerá cáncer?, ¿quién sufrirá de un ataque cardíaco?, ¿cuánto tiempo pasará antes de que una persona con VIH desarrolle SIDA?, ¿cuáles serán los efectos sobre la salud humana de emplear tecnologías nucleares para la producción de energía eléctrica? o ¿cuáles serán las consecuencias del cambio climático? (Firth, 1991; Bodansky, 1991; Callon et al., 2009).

La importancia de considerar estas incertidumbres irreducibles en este trabajo de investigación radica en que algunos de los campos del conocimiento en los que se ha hecho más evidente su presencia han sido la medicina y el estudio de cuestiones ambientales (Callon et al., 2009).

A modo de respuesta, las primeras políticas ambientales estuvieron motivadas por la preocupación de los potenciales efectos sobre la salud de las personas como consecuencia de algunas actividades humanas. En su momento, dichas políticas estuvieron marcadas por un enfoque netamente curativo en el que se aplicaba ampliamente el principio de “el que contamina paga”; sin embargo, pronto fue evidente que, por sí solo, este principio no podía limitar los daños o impactos que se generaran y desconocía la existencia de daños que no podían ser compensados o mitigados (COMEST, 2005).

Considere, por ejemplo, un grupo de personas cuya salud resulta significativamente afectada por cierta actividad industrial. Poco importará la disposición y capacidad de pago de los propietarios de la industria, si aún no existen los desarrollos médicos adecuados para el tratamiento de la afectación causada, de tal manera que se logre restablecer el nivel previo de salud que tenían las personas.

Se adoptó entonces un enfoque preventivo que se sustentaba en la creencia de que la ciencia podía identificar, evaluar y cuantificar de manera confiable los riesgos asociados a cierta actividad humana; se le denominó Principio de Prevención. Este principio partía de suponer que la ciencia podía entregar, a partir de antecedentes fidedignos, probabilidades precisas para abordar los riesgos de la actividad, por ejemplo, acordando niveles aceptables de riesgo y adoptando medidas para mantenerlo por debajo de dicho nivel (COMEST, 2005).

Sin embargo, con el paso de los años los seres humanos hemos empezado a entender la necesidad de un enfoque que se base en reconocer que, como en el caso de los organismos genéticamente modificados o en el del cambio climático, se pueden

presentar fenómenos que no podemos anticipar ni cuantificar pero que son potencialmente catastróficos (COMEST, 2005).

Al respecto, la COMEST (2005) reseña un ejemplo bastante ilustrativo. Aunque hoy en día se sabe que inhalar asbesto⁶⁷ es la principal causa del cáncer mesotelioma⁶⁸, tuvo que pasar más de un siglo desde la fecha en que inició la minería de asbestos, 1879, y la fecha en que finalmente se empezó a prohibir su utilización, 1998.

La importancia de este ejemplo reside en que permite ilustrar dos aspectos que influyeron en el surgimiento de lo que más adelante se denominó el Principio de Precaución. Por un lado, la ignorancia respecto a los efectos secundarios que producía en la salud de las personas inhalar estos minerales. Prueba de ello es que los primeros soportes para una sospecha razonable llegaron en 1911 - más de 30 años después de iniciar la minería de asbestos - luego de realizar experimentos en ratas y gracias al creciente número de reportes de muertes de trabajadores en industrias relacionadas con el mineral.

Por otro lado, permite evidenciar la potencialidad catastrófica que puede llegar a representar un peligro aun cuando no lo identifiquemos plenamente; expertos citados por la COMEST (2005) estiman que sólo en la Unión Europea hacia el año 2040 habrán muerto entre 250.000 y 400.000 personas debido a enfermedades ocasionadas por haber estado expuestos en el pasado a estos minerales tóxicos.

"Pensar con precaución" tiene una historia relativamente larga. Uno de los ejemplos más antiguos de los que se tiene conocimiento es la situación documentada por el médico inglés John Snow, quien en 1854 recomendó cerrar una bomba hidráulica en Londres con el objetivo de detener una epidemia de cólera en la ciudad. Para entonces, la evidencia para poder concluir que existía una relación de causalidad entre el contacto con líquido proveniente de la bomba en cuestión y la expansión de la epidemia era débil y no era (en términos de abogados) "una prueba más allá de la duda razonable"⁶⁹; sin embargo, la decisión de suspender la bomba resultó ser una medida exitosa que ayudó a disminuir las tasas de expansión de la epidemia (Harremoës et al., 2001).

A partir de entonces, muchos años tuvieron que pasar para que este enfoque de política fuera formalmente adoptado por un tratado de alcance internacional: la declaración de la ONU de Río de Janeiro de 1992 sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. A pesar de

⁶⁷ Grupo de minerales que, gracias a sus características, se usaban ampliamente en la manufactura de productos como tejas, cemento, textiles y envases, entre otros.

⁶⁸ Una forma de cáncer que tiene un periodo de incubación muy largo pero que una vez se manifiesta es fatal en un periodo de un año.

⁶⁹ Experimentos concluyentes en el sentido de que en efecto sí existía una relación de causalidad entre el consumo de agua proveniente de la bomba identificada por Snow y la expansión de la epidemia fueron realizados 3 décadas después por el científico alemán Robert Koch (Goldstein, 2012).

esto y de todas las discusiones que se han desarrollado en torno al enfoque que plantea el Principio de Precaución, aún no existe un consenso alrededor de la forma como debe interpretarse ni de sus implicaciones. En este sentido, la COMEST (2005) ha realizado un análisis de diferentes planteamientos que se han hecho en torno al principio de precaución y sintetiza algunos puntos en común:

- El principio de precaución debe aplicarse cuando existan incertidumbres científicas considerables sobre la causalidad, la magnitud, la probabilidad o la naturaleza de un daño que se pueda ocasionar.
- El detonante - ¿qué significa una incertidumbre “considerable”? - es un análisis científico que arroje preocupaciones plausibles o científicamente argumentables; es decir, que no puedan refutarse fácilmente.
- A diferencia del Principio de Prevención, para aplicar el principio de precaución no es necesario contar con una probabilidad cuantificada del riesgo al que se está exponiendo.
- Debe aplicarse cuando se esté en riesgo de peligros “inaceptables”. Aunque las diferentes definiciones que existen no utilizan el mismo lenguaje, todas coinciden en usar palabras que expresan un juicio moral acerca de la aceptabilidad del daño.
- La intervención que se deriva de aplicar el principio de precaución debe materializarse antes de que ocurra el daño.
- La intervención que se decida ejecutar debe ser proporcional al nivel escogido de protección y a la magnitud del riesgo que quiere evitarse; deben considerarse otros costos aparte de los económicos.

A partir de este análisis, la COMEST (2005) propone la siguiente definición - aún en construcción - del principio de precaución (p. 14):

“Cuando las actividades humanas puedan conducir a daños moralmente inaceptables que sean científicamente plausibles pero inciertos, se tomarán acciones para evitar o disminuir el daño. Los daños moralmente inaceptables se refieren a daños a los seres humanos o al entorno [natural] que:

- *amenacen la vida o la salud de las personas, o*
- *sean serios y efectivamente irreversibles, o*
- *no sean equitativos con generaciones presentes o futuras, o*
- *se impongan sin la adecuada consideración de los derechos humanos de aquellos afectados.*

El juicio acerca de la plausibilidad debería estar basado en un análisis científico. Este análisis debería continuar en el tiempo de tal manera que las acciones escogidas puedan someterse a revisión.

La incertidumbre puede aplicar, pero sin estar limitada, a la causalidad o a los límites del daño potencial.

Las acciones son intervenciones que se emprenden antes de que el daño ocurra y que buscan evitarlo o disminuirlo. Estas acciones deberían escogerse de tal manera que sean proporcionales a la seriedad del daño potencial, considerando sus consecuencias tanto positivas como negativas e incorporando una evaluación moral de las implicaciones de actuar y de no actuar. La elección de actuar debería ser el resultado de un proceso participativo” [Traducción propia]

Pese a la popularidad que ha ganado en las últimas décadas el Principio de Precaución, tanto este como el no tan popular Principio de Prevención tienen mucho que ver con la realización del proceso de EIA. Al respecto, para el caso colombiano es pertinente considerar algunos pronunciamientos de la Corte Constitucional.

En primer lugar, el alto tribunal ya ha reconocido mediante la sentencia C-703 de 2010 que los principios de prevención y precaución buscan dotar a las respectivas autoridades de instrumentos para actuar ante la afectación, el daño, el riesgo o el peligro al que se vería expuesto el ambiente en situaciones que lo comprometan de manera grave, al igual que a los derechos con él relacionados. Aunque esta sentencia no menciona explícitamente la EIA como un instrumento en el que se materializa el principio de precaución, con base en otros pronunciamientos de este mismo tribunal podemos argumentar que lo es.

Por ejemplo, en la sentencia C-328 de 1995, la Corte señaló que el Estado ejerce su deber de prevención y control del deterioro ambiental, entre otras formas, a través del otorgamiento, denegación o cancelación de las licencias ambientales. En este mismo sentido, el mismo tribunal señaló en la sentencia C-328 de 1999 que uno de los mecanismos técnicos de los que dispone el Estado para el cumplimiento de su deber de prevenir y controlar el deterioro ambiental es el establecimiento de estudios ambientales previos que le permitan a la autoridad conceder o no la licencia ambiental solicitada.

En caso de ser otorgada, la sentencia C-746 de 2012 advierte que la licencia también es protectora porque su esencia contempla la posibilidad de someter la autorización del proyecto al cumplimiento de una serie de obligaciones de estricto cumplimiento durante su construcción, ejecución y terminación, so pena de que dicha autorización sea suspendida o cancelada por parte de la autoridad ambiental.

En otras palabras, resulta evidente que, a pesar de las grandes dificultades que existen a la hora de predecir el comportamiento del ambiente, los principios de prevención y precaución, materializados en instrumentos como los estudios y licencias ambientales, justifican la necesidad de realizar esta tarea y de procurar su mejoramiento.

Teniendo en cuenta que el desarrollo de una EIA es el escenario en el que se reúne la información necesaria para realizar los análisis científicos que tengan por objetivo

establecer los daños plausibles que podrían materializarse como consecuencia del desarrollo de un proyecto, la aplicación de estos principios en la EIA podría verse reflejada bien en la negación de la licencia ambiental solicitada o en la imposición de medidas al momento de otorgar la licencia de tal forma que se pueda prevenir, mitigar, corregir o compensar potenciales impactos ambientales.

Asimismo, se evidencia la importancia de la etapa de Seguimiento y Control toda vez que puede aportar insumos importantes en términos de identificación de indicios de potenciales impactos ambientales que no hayan sido identificados anteriormente y que sustenten la decisión de modificación de las condiciones con las que se otorgó la licencia o incluso su suspensión o cancelación.

En general, resulta evidente que las múltiples fuentes de incertidumbre que existen a lo largo del proceso de EIA deben guiar a los tomadores de decisión - en principio a los que representan los intereses del Estado - a adoptar una posición preventiva y, cuando así se requiera, una acorde con el principio de precaución bien sea negando la autorización solicitada, imponiendo condiciones para su otorgamiento o a la hora de modificarlas.

A partir de la aplicación de estos principios, a lo largo de la próxima sección planteamos una serie de lineamientos metodológicos que tienen por objetivo servir de guías para la incorporación del concepto de incertidumbre a lo largo del proceso de EIA.

2.4 Lineamientos metodológicos

A partir del marco teórico al que corresponde el primer capítulo de este trabajo, su aplicación al análisis del comportamiento del ambiente como fenómeno complejo y teniendo en cuenta el análisis del proceso de EIA a partir de las fuentes de incertidumbre identificadas, a continuación presentamos un conjunto de lineamientos metodológicos que tienen por objetivo facilitar la incorporación del concepto de incertidumbre a lo largo del proceso de EIA. En otras palabras, estos lineamientos pretenden convertirse en un puente entre los planteamientos teóricos desarrollados previamente y los diferentes métodos por medio de los cuales podrían implementarse.

En este sentido, vale la pena advertir que con estos lineamientos no pretendemos identificar métodos específicos para adoptar a la hora de realizar procesos de EIA - la investigación de estos métodos excede el alcance de este trabajo de investigación -; por el contrario, estos lineamientos son guías generales para la realización del proceso de EIA que pueden ser implementados de diversas maneras.

El proceso de formulación de estos lineamientos partió de suponer que la incorporación del concepto de incertidumbre puede mejorar el proceso de modelación del que trata la

EIA. Cada lineamiento es presentado de manera individual por medio de una ficha que se estructura de la siguiente manera.

En primer lugar, una sección descriptiva en la que se incluye el fundamento teórico que justifica la formulación del lineamiento, seguida de la explicación de la idea central que buscamos transmitir, el análisis de la forma como se está realizando el proceso de EIA en el país en relación con el lineamiento expuesto, la identificación de aquellos actores dentro del proceso a quienes correspondería su implementación e ideas preliminares de métodos o herramientas que podrían utilizarse. A continuación, la ficha incluye dos secciones más en las que se enuncian las fuentes de incertidumbre que aborda el lineamiento y las etapas y/o actividades del proceso a las que aplicaría.

El orden en que se presenta cada lineamiento depende del orden cronológico dentro del proceso de EIA de las actividades o etapas a las que aplica (ver Figuras 12 y 13). De esta forma, iniciamos con los lineamientos que aplican a las primeras actividades del proceso, dejando para el final aquellos que afectan todo el proceso de EIA. Posterior a la presentación de cada lineamiento de manera individual, a modo de síntesis presentamos un listado que recoge los nombres de los lineamientos propuestos, las fuentes de incertidumbre que aborda cada uno y las etapas y/o actividades del proceso a las que aplicarían (ver Tabla 1).

Lineamiento No. 1

Incorporación de criterios ambientales en la planeación de proyectos

Teniendo en cuenta que cualquier proyecto que se implemente tiene potencial para generar presión o afectación de los sistemas ecológicos y socio-culturales con los que está en constante interacción, consideramos importante realizar una evaluación de estas afectaciones ambientales, aunque los proyectos no requieran licencia ambiental. De manera similar, el estudio contratado por DNP (2013) sugiere que es conveniente que todos los proyectos realicen un proceso de EIA, independientemente de si deben o no sujetarse al trámite de una licencia ambiental.

Ahora bien, el hecho de que planteemos que todos los proyectos deban realizar una evaluación de las afectaciones ambientales que podría generar no significa que todas estas evaluaciones deban realizarse con el mismo nivel de detalle - y de recursos - necesario para un EsIA tradicional. Por el contrario, el nivel de detalle de la evaluación que se realice debería variar en función del tipo de proyecto que se quiera hacer y de las características del área de influencia que se pretenda intervenir; una estrategia podría ser la realización de Evaluaciones Ambientales Estratégicas junto con la elaboración de EsIA de diferente nivel de complejidad y exigencia.

En este sentido, resultaría muy provechoso que la evaluación realizada se desarrolle de manera paralela y complementaria al proceso de maduración del proyecto, avanzando progresivamente hacia el nivel de detalle deseado y realizando ajustes sobre el proyecto a partir de los resultados de la evaluación de afectaciones ambientales realizada. Esto evitaría tener que esperar a que finalice la elaboración del EsIA tradicional para realizar cambios sobre el proyecto.

Desafortunadamente, el DNP (2013) ya ha advertido los grandes retos que existen para la incorporación de criterios ambientales en la etapa de planeación de los proyectos, estando restringida actualmente a la elaboración y presentación de un DAA sólo en algunos casos específicos.

Si bien la aplicación última de este lineamiento corresponde a los proponentes de los proyectos encargados de su planeación, para que esto sea posible es necesario que medie un proceso de reglamentación de esta etapa por parte de la autoridad ambiental correspondiente en el que, por ejemplo, se establezcan definiciones para la aplicación de la disposición - ¿qué se entiende por "proyecto"?

Dificultades que aborda

- Falta de correspondencia de los modelos con las características de los sistemas complejos.

Partes del proceso a las que aplicaría

Etapa de Planeación

Lineamiento No. 2
Uso de modelos adecuados para el modelamiento del ambiente

Existen algunas características de los sistemas complejos que nos permiten justificar la necesidad de emplear modelos adecuados para representar el ambiente. Nos referimos al hecho de que este tipo de sistemas estén compuestos por una gran cantidad de elementos con inter-relaciones que suceden de manera simultánea y al hecho de que estén compuestos y, a su vez, hagan parte de otros sistemas complejos. Utilizar modelos que incorporen estas características permitiría facilitar la identificación de impactos y realizar análisis con diferentes niveles de detalle.

Actualmente, la descripción del sistema ambiente se realiza por medio de la elaboración de una línea base que es el resultado del levantamiento de información primaria y la revisión de información secundaria que se sintetizan en una descripción lingüística que a menudo es acompañada de algunos datos numéricos y gráficas que, sin embargo, no logran representar adecuadamente el gran número de relaciones que existen entre los diferentes componentes del sistema complejo ni las jerarquías de sistemas que existen a su interior. Algo similar sucede con la matriz de doble entrada usada convencionalmente para identificar y valorar impactos ambientales.

Meadows (2009) advierte que para discutir acerca de sistemas complejos es necesario usar un lenguaje que comparta sus propiedades. En este sentido, consideramos que aunque la línea base y la matriz de doble entrada pueden resultar ilustrativas como un primer acercamiento, resultan insuficientes a la hora de representar características del ambiente como las mencionadas.

Algunas ideas en la búsqueda de herramientas que permitan un mejor modelamiento del ambiente pueden ser las herramientas usadas por la dinámica de sistemas y reseñadas por Aracil (1996), particularmente los diagramas de influencias, los modelos de redes reseñados por Toro (2009) y Martínez (2013) o la utilización de software especializado que permita realizar análisis a diferentes niveles de detalle, aplicando la descomposición propuesta por Duarte (2000) tanto para el ambiente como para las actividades del proyecto (Fig. 1.2 y 1.3). Estas herramientas podrían incluirse dentro de los Términos de Referencia para la elaboración de EsIA que elabora el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

En este caso, la responsabilidad principal por la aplicación de este lineamiento recaería sobre las personas encargadas de investigar y proponer modelos adecuados para la representación del ambiente, de aquellas que sugieren o exigen su uso y de los que los aplican para la elaboración de un DAA o un EsIA particular.

.....

<p>Dificultades que aborda</p> <ul style="list-style-type: none"> - Falta de correspondencia de los modelos con las características de los sistemas complejos. 	<p>.....</p>	<p>Partes del proceso a las que aplicaría</p> <ul style="list-style-type: none"> 2. Elaboración de DAA 4. Selección de alternativa 5. Elaboración de EsIA 7. Evaluación de EsIA
--	--------------	--

Lineamiento No. 3

Uso de niveles y tendencias asociadas a factores ambientales

Analizar los niveles asociados a cada factor ambiental y su correspondiente tendencia tiene una gran importancia cuando se trata de anticipar cambios en el comportamiento de un sistema, toda vez que dichos niveles son indicadores de la capacidad de resiliencia de un sistema complejo. En este sentido, los niveles de estos stocks y sus tendencias pueden aportar insumos valiosos a la hora de determinar la importancia de los impactos ambientales que cierto proyecto pueda generar en el ambiente.

Si bien al momento de construir la línea base para un EsIA pueden incluirse los niveles asociados a algunos factores ambientales - por ejemplo, el número de hectáreas restantes de cierto bosque o el número de individuos de cierta comunidad étnica amenazada -, estos sólo suelen ser incorporados de manera descriptiva, por lo que al momento de calcular la importancia de un impacto ambiental estos niveles y los análisis de sus tendencias sólo se incluyen de manera indirecta a través de los juicios que emita cada experto y los modelos en los que base estos juicios.

Por el contrario, consideramos que puede resultar provechoso incluir de manera explícita estos indicadores a la hora de determinar la importancia de los impactos ambientales. En este sentido, Toro (2009) plantea la incorporación de la vulnerabilidad de los factores ambientales a la hora de calcular la importancia de los impactos, a partir de indicadores numéricos que reflejen los niveles asociados a los factores ambientales considerados. Asimismo, valdría la pena explorar la incorporación dentro de la ecuación usada para calcular la importancia de cada impacto ambiental de modelos matemáticos más sofisticados, como las ecuaciones diferenciales o la modelación usando variables de estado para sistemas dinámicos, que reflejen las tendencias asociadas al nivel de cada factor ambiental.

Por supuesto, la implementación de este lineamiento corresponde tanto a aquellas personas encargadas de proponer métodos específicos para la estimación de la importancia de los impactos ambientales, así como a aquellas personas que seleccionan y aplican ciertos métodos para la realización de un EsIA.

Dificultades que aborda

- Falta de correspondencia de los modelos con las características de los sistemas complejos.
- Contexto en el que se usa el modelo.

Partes del proceso a las que aplicaría

- 5.1 Elaboración de línea base
- 5.2 Identificación de factores ambientales
- 5.5 Valoración de impactos ambientales

Lineamiento No. 4

Análisis de la importancia de impactos ambientales orientados a facilitar el diseño y aplicación de PMAs

Los PMAs son instrumentos que se construyen a partir de la evaluación y valoración de impactos ambientales y agrupan medidas y actividades orientadas a prevenir, mitigar, corregir o compensar los impactos ambientales identificados. En este sentido, estos planes pueden usarse como herramientas muy útiles a la hora de fortalecer la resiliencia de los subsistemas que componen el ambiente, de tal forma que se garantice siempre que el impacto neto de un proyecto sea positivo (deberíamos estar mejor después del proyecto).

Para lograrlo deben realizarse acciones en varios sentidos. En primer lugar, deben incluirse indicadores de la resiliencia de los factores ambientales seleccionados a la hora de evaluar los impactos (Lineamiento No. 3). Una vez evaluados los impactos, corresponde, además de los análisis tradicionales realizados para cada impacto de manera individual, formalizar otro tipo de análisis que permitan obtener una perspectiva general de la afectación por cada factor ambiental y por cada actividad del proyecto; una buena idea son los análisis agregados expuestos por Duarte (2000). Por último, debe garantizarse que exista una correspondencia y una articulación entre los análisis realizados y las medidas formuladas dentro del PMA. En ese sentido la autoridad ambiental debería exigir medidas de manejo ambiental de mayor complejidad como las preventivas y mitigatorias para los impactos severos y críticos y en todos los casos de manera complementaria las medidas de compensación.

Teniendo en cuenta que actualmente no se incluyen de manera formal indicadores de la resiliencia de los factores ambientales a la hora de evaluar los impactos y que no es usual que se realicen análisis agregados como los enunciados, podemos concluir que este lineamiento presenta una oportunidad de mejora para la realización y modificación iterativa de PMAs.

Considerando que este lineamiento afecta las actividades de evaluación de impactos y de formulación del PMA respectivo, su aplicación corresponde a las personas encargadas de diseñar y/o aplicar metodologías para la valoración de los impactos, así como a aquellas personas responsables de la formulación y/o ajuste del PMA respectivo. En este sentido, vale la pena tener en cuenta que, aunque es el proponente del proyecto el responsable de presentar el EsIA y el PMA respectivo a la autoridad ambiental, ésta bien puede modificarlo o solicitar la modificación previo al otorgamiento de la licencia ambiental solicitada.

Dificultades que aborda

- Falta de correspondencia de los modelos con las características de los sistemas complejos.

Partes del proceso a las que aplicaría

- 5.5 Valoración de impactos ambientales
- 5.9 Elaboración de PMA
- 7 Evaluación de EsIA

Lineamiento No. 5

Uso de modelos matemáticos formales para el tratamiento de información cualitativa y cuantitativa

La descripción del ambiente - uno de los insumos para el cálculo de la importancia de los impactos ambientales - implica usar información cualitativa y cuantitativa simultáneamente. Esto plantea un problema; gracias al mecanicismo, hemos masificado el uso de modelos matemáticos - unos más otros - que nos permiten trabajar con información cuantitativa de manera adecuada. Sin embargo, a pesar de su desarrollo en las últimas décadas, los modelos matemáticos para el tratamiento de información cualitativa continúan siendo prácticamente desconocidos. En este sentido, es deseable la incorporación de modelos matemáticos formales que permitan tratar ambos tipos de información de manera simultánea.

En el caso de la EIA, al analizar la forma en la que se adapta la metodología genérica de Conesa a la elaboración de EsIA en el país, observamos que la valoración de impactos ambientales contempla en última instancia el cálculo de la importancia de los impactos ambientales basándose en sencillas operaciones matemáticas que involucran únicamente indicadores numéricos que representan diferentes características del impacto valorado. Si bien algunos de estos indicadores provienen de la aplicación de escalas de equivalencia, consideramos que la aplicación de estas escalas por sí solas es una forma inadecuada de tratar la información cualitativa y cuantitativa de la que se dispone.

Con el objetivo de incorporar directamente en el cálculo de la importancia de los impactos ambientales información tanto cuantitativa como cualitativa, pueden resultar muy útiles los trabajos de Duarte (2000) y Peche y Rodríguez (2009) que se basan en aplicar métodos basados en técnicas difusas para el tratamiento de información cualitativa a la valoración de impactos ambientales.

Una vez más, la implementación de este lineamiento corresponde tanto a aquellas personas encargadas de proponer métodos específicos para la estimación de la importancia de los impactos ambientales, así como a aquellas personas que los seleccionan y aplican.

Dificultades que aborda

- Valoraciones cualitativas y cuantitativas
- Información imprecisa

Partes del proceso a las que aplicaría

5.5 Valoración de impactos ambientales

Lineamiento No. 6
Justificación de indicadores, parámetros y atributos utilizados

Todas las valoraciones que realizamos los seres humanos - por ejemplo, la valoración de impactos ambientales - son en esencia cualitativas y, por ende, incorporan cierto grado de subjetividad. Sin embargo, esto no significa que las valoraciones que se hagan tengan que ser arbitrarias (Garmendia, Salvador, Crespo, & Garmendia, 2005). Aunque esta situación afecta todas las valoraciones que se hagan a lo largo del proceso de EIA, resulta particularmente importante considerarla en la valoración de impactos ambientales.

De esta forma, advertimos como inconveniente el alto nivel de subjetividad y aparente arbitrariedad que existe a la hora de realizar valoraciones de impactos ambientales en el marco de la elaboración de EsIA en el país, hecho que ha sido señalado por Martínez (2013). Esta aparente arbitrariedad, que bien podría corresponder a cierta intencionalidad, se evidencia en la alta frecuencia con que se modifican los atributos que se tienen en cuenta a la hora de calcular la importancia de cierto impacto.

Aunque es importante tener en cuenta que dependiendo, por ejemplo, del tipo de proyecto o el área de influencia identificada sea deseable usar - o no - algunos atributos o modificar los valores que se les asignan, lo que resulta preocupante es que esta elección se realice sin incluir una justificación técnica que soporte la elección realizada. En este sentido, llamamos la atención sobre la necesidad de justificar de manera clara y suficiente la elección de los atributos que se consideren en cada situación y la calificación de los mismos.

En este caso, la implementación de este lineamiento es una responsabilidad principalmente de las personas que elaboran un EsIA y que, por ende, deben seleccionar la metodología y los métodos más adecuados para la evaluación de los impactos ambientales que pueda ocasionar el proyecto. De parte de la autoridad ambiental competente, una actividad que podría mejorar el proceso es la realización de análisis de sensibilidad sobre los diferentes parámetros utilizados que permitan identificar aquellos que son particularmente susceptibles de subjetividad.

.....	
<p style="text-align: center;">Dificultades que aborda</p> <ul style="list-style-type: none"> - Subjetividad - Intencionalidad - Sensibilidad a los parámetros del modelo - Contexto en el que se usa el modelo 	<p style="text-align: center;">Partes del proceso a las que aplicaría</p> <ul style="list-style-type: none"> 5.4 Identificación de impactos ambientales 5.5 Valoración de impactos ambientales 5.9 Elaboración de PMA

Lineamiento No. 7

Fortalecimiento de la etapa de Seguimiento y Control

Los comportamientos que exhiben los sistemas complejos pueden caracterizarse por incorporar un componente de aleatoriedad o por ser sensibles a las condiciones iniciales, de tal forma que las predicciones que se hagan sobre su comportamiento incluyen un gran componente de incertidumbre. En el caso de la EIA, esto implica que, al momento de implementar un proyecto, muy probablemente se presentarán impactos ambientales que no es posible prever oportunamente.

Esta característica justifica que se le otorgue una importancia especial a la etapa de Seguimiento y Control dentro del proceso de EIA, toda vez que es en esta etapa que la autoridad ambiental, mediante visitas de campo, puede verificar los impactos ambientales que en efecto se manifiestan. Como resultado de esta etapa, la autoridad puede modificar el PMA del proyecto para incluir nuevas medidas en aquellos casos en los que aquellas contempladas inicialmente no hayan sido efectivas o en los casos en los que se identifiquen impactos que no hayan sido predichos.

Teniendo en cuenta que una de las conclusiones del informe presentado por el DNP (2013) coincide en otorgarle una importancia especial a esta etapa del proceso, llama la atención que la Contraloría General de la República ya ha denunciado¹ que la ANLA sólo está realizando seguimiento al 14% de las licencias ambientales que otorgó entre los años 2011 y 2014. Este desconocimiento de la importancia de la etapa de seguimiento y control se refleja también en el amplio plazo que la normatividad ambiental² otorga para la utilización de una licencia ambiental luego de otorgada: 5 años.

Es claro que en este caso la responsabilidad de aplicar este lineamiento corresponde a las autoridades ambientales encargadas de otorgar o negar licencias ambientales y de hacer el correspondiente seguimiento. En este sentido, resulta importante tener presente que en la actualidad las autoridades ambientales realizan cobros a los titulares de las licencias ambientales por las labores de seguimiento y control; asimismo, llama la atención que el informe del DNP (2013) haya concluido que hay disposición a pagar más por parte de los proponentes de los proyectos, siempre y cuando se brinde un mejor servicio.

De manera complementaria, puede ser de utilidad la idea de implementar veedurías ciudadanas expuesta por el DNP (2013).

Dificultades que aborda

- Sensibilidad a las condiciones iniciales
- Sensibilidad a los parámetros del modelo
- Fenómenos aleatorios

Partes del proceso a las que aplicaría

Etapa de Seguimiento y Control

¹ Comunicado de prensa No. 53 de abril 14 de 2015.

² Decreto 1076 de 2015, artículo 2.2.2.3.8.7.

Lineamiento No. 8 **Conformación de equipos con enfoque interdisciplinario**

Gracias al gran número de elementos que componen el ambiente, al analizar los impactos que un determinado proyecto puede provocar sobre el sistema deben incluirse en el análisis aspectos de diferentes áreas del conocimiento, como lo son la biología, la geografía, la geología, la economía, la ingeniería, las ciencias de la salud y la agronomía entre otras.

Aunque la lista de áreas del conocimiento que deben tenerse en cuenta para un análisis de tal naturaleza dependerá del tipo de proyecto y de la ubicación en la que se quiera realizar, resulta evidente la necesidad de que dicho análisis sea realizado por equipos que estén conformados por expertos en cada una de las áreas de interés que se identifiquen y que trabajen implementando un enfoque interdisciplinario.

Aunque en su estudio Martínez (2013) concluye que las empresas consultoras encargadas de la elaboración de EsIA, en general, procuran incorporar profesionales de diferentes áreas del conocimiento en sus equipos de trabajo, llama la atención particularmente que los equipos conformados al interior de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales - ANLA - la autoridad ambiental con competencia para evaluar las solicitudes de licenciamiento ambiental de los proyectos de mayor envergadura en el país - sólo involucren, en general, tres personas que representan el medio social¹, el medio físico² y el medio biótico³.

En este sentido, consideramos importante realizar una evaluación acerca de este aspecto y la implementación de directrices sobre la composición de equipos de profesionales encargados de elaborar los EsIA, tal y como lo señala el documento CONPES 3762 de 2013, aprovechando la oportunidad para aplicarlas también a los equipos encargados de evaluar dichos estudios en las autoridades ambientales competentes. De tal manera, la responsabilidad de aplicar este lineamiento recae principalmente sobre las autoridades ambientales - o sobre las entidades que elaboran las directrices que estas entidades implementan - y sobre las empresas consultoras encargadas de elaborar los estudios ambientales.

Dificultades que aborda	Partes del proceso a las que aplicaría
<p>- Falta de correspondencia de los modelos con las características de los sistemas complejos.</p>	<p>Todo el proceso de EIA</p>

¹Un profesional de las siguientes áreas: Antropología, Comunicación Social, Ciencias Humanas y Sociales, Sociólogos, Trabajo Social o Psicología.

²Un profesional de las siguientes áreas: Ingeniería Ambiental, Ingeniería Civil, Geología, Ingeniería en Recursos Hídricos, Administración Ambiental, Ingeniería de Minas, Ingeniería Química, Ingeniería Sanitaria, Ingeniería Ambiental y Sanitaria o Ingeniería de Petróleos.

³Un profesional de las siguientes áreas: Biología, Ecología, Ecología de Zonas Costeras, Ingeniería Forestal o Biología Marina.

Lineamiento No. 9

Empleo de mecanismos de participación efectivos

Partiendo de reconocer el gran número de actores que pueden verse afectados por la implementación de proyectos que impacten el ambiente, resulta importante incorporar los puntos de vista, preocupaciones y objeciones que puedan tener al respecto. Asimismo, el hecho de que la descripción que se incorpora en la línea base esté sujeta a incertidumbres internas - de aquellos que la elaboraron - justifica la necesidad de propiciar el intercambio de conocimientos con otras personas interesadas que puedan contribuir a enriquecer el proceso.

En este sentido, consideramos importante que los mecanismos de participación que se empleen sean efectivos en el sentido de que satisfagan los siguientes aspectos. Por un lado, los mecanismos que se utilicen deben garantizar que se involucre a una proporción representativa de todos los actores afectados, a la vez que se asegure el entendimiento del alcance del proyecto y de los potenciales impactos que generaría. Asimismo, resultaría deseable que estos mecanismos se implementen a lo largo de todo el proceso de EIA, incluyendo las etapas de Planeación, Evaluación y Seguimiento y que tengan algún grado de vinculación. En este sentido, resulta llamativa la propuesta de Callon et al. (2009) de implementar lo que los autores denominan “foros híbridos”, toda vez que estos espacios de participación son “aparatos poderosos para la exploración y el aprendizaje”.

Aunque la normativa vigente contempla la realización de sesiones de socialización que tienen por objetivo informar a la población acerca de los potenciales impactos ambientales y de sus correspondientes medidas de manejo¹, el informe elaborado por DNP (2013) evidenció varias dificultades relacionadas con los procesos de participación de las comunidades no étnicas. Entre estas dificultades sobresalen la falta de oportunidad y la pertinencia de la información recibida por las comunidades, el desconocimiento de las actividades que puedan generar mayores impactos y la baja cultura de participación que existe en el país. En este sentido, consideramos pertinente la propuesta de dicho informe de realizar Audiencias Públicas de manera obligatoria para todo proyecto sujeto a licenciamiento ambiental.

Considerando la propuesta y las limitaciones expuestas, la implementación de este lineamiento corresponde tanto a la autoridad ambiental encargada de reglamentar y supervisar los procesos de participación, como a las empresas encargadas de llevarlos a cabo.

Dificultades que aborda

- Contexto en el que se usa el modelo
- Incertidumbre interna en las descripciones realizadas

Partes del proceso a las que aplicaría

Todo el proceso de EIA

¹Decreto 1076 de 2015, artículo 2.2.2.3.3.3

Lineamiento No. 10
Fortalecimiento del Sistema de Información Ambiental de Colombia – SIAC

Teniendo en cuenta la complejidad del fenómeno con el que trata la EIA, podemos concluir que recopilar y analizar toda la información que permita construir un nivel de conocimiento razonablemente bueno del área de influencia de un proyecto es un reto imposible de cumplir en un tiempo relativamente corto. En este sentido, contar con un sistema de información ambiental oficial y actualizado es un insumo muy valioso.

En la medida que este sistema de información almacene datos desagregados e indicadores ambientales de las diferentes regiones del país, esta herramienta puede usarse para reducir o formalizar las incertidumbres relacionadas con información errónea o con un estado de conocimiento incompleto que tengan los diferentes actores que participan en el proceso.

Resulta preocupante la debilidad que caracteriza el estado del SIAC (DNP, 2013). Este sistema, que debería ser la fuente oficial de información ambiental de todo el país, concentra sólo información desactualizada y con baja representatividad del territorio¹; es tal el nivel de debilidad que la ANLA ha iniciado, mediante el proyecto denominado “Regionalización”, la consolidación de la información ambiental levantada por los solicitantes de licencias ambientales (la mayoría empresas privadas) y entregada a la entidad como parte de los EsIA que incluyen en la solicitud. En su informe, el DNP (2013) señala las inconveniencias que plantea esta iniciativa.

Teniendo en cuenta los grandes beneficios que representaría para todo el proceso de EIA - y en general para los procesos de toma de decisiones que requieran información ambiental -, consideramos urgente el fortalecimiento de dicho sistema de información incluyendo los otros sistemas que lo componen y, particularmente, el Sistema Nacional de Indicadores Ambientales. Por supuesto, dicho fortalecimiento debería contemplar acciones más ambiciosas que la sistematización de la información recopilada por los solicitantes de licencia ambiental; podría ser esta una buena oportunidad para centralizar el abundante conocimiento en temas ambientales que produce el sector académico y para realizar el levantamiento de información que resulte inexistente.

.....

<p style="text-align: center;">Dificultades que aborda</p> <ul style="list-style-type: none"> - Contexto en el que se usa el modelo - Incertidumbre en las descripciones realizadas (Imperfección de la información) 	<p style="font-size: 2em;">⋮</p>	<p style="text-align: center;">Partes del proceso a las que aplicaría</p> <p style="text-align: center;">Todo el proceso de EIA</p>
---	----------------------------------	--

¹ Vale la pena mencionar que este documento fue escrito antes de que se realizara el relanzamiento del SIAC, anunciado el pasado 16 de diciembre de 2015 por el Ministro de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible Gabriel Vallejo.

Lineamiento No. 11 **Implementación de mecanismos de trazabilidad**

Gracias a la naturaleza compleja del fenómeno con el que trata, el proceso de EIA se caracteriza por incorporar varios actores a lo largo de sus etapas y por enfrentar múltiples fuentes de incertidumbre que pueden incidir en la utilidad de la predicción realizada. En este sentido, es de fundamental importancia incorporar mecanismos que les permitan a todos los actores involucrados entender la forma en que las demás personas involucradas previamente han incorporado - o no - las fuentes de incertidumbre que se pueden manifestar a lo largo del proceso.

En principio, la sola obligación de incorporar tales mecanismos de trazabilidad puede incidir positivamente en el nivel de incorporación de las fuentes de incertidumbre identificadas. Asimismo, entender las razones que llevaron a la toma de todas las decisiones a lo largo del proceso puede resultar beneficioso para varios de los actores involucrados, toda vez que puede permitir evaluar el nivel de rigurosidad y pertinencia con que se realizaron los análisis y evaluaciones previas. Particularmente, en el caso de la autoridad ambiental y de la comunidad en general este entendimiento puede marcar la diferencia entre coincidir o no con las decisiones tomadas por los demás actores involucrados.

Actualmente, las empresas consultoras encargadas de la elaboración de EsIA tienen grandes retos - u oportunidades - para la incorporación de estos mecanismos de trazabilidad (ver Lineamiento No. 6). En cuanto a la autoridad ambiental, aunque todas las decisiones que toma en relación con el proyecto quedan documentadas en los respectivos actos administrativos que acompañan el trámite de la licencia, la trazabilidad resulta poco operativa en la práctica ya que, en caso de desearlo, debe consultarse el expediente del proyecto que fácilmente puede abarcar varios centenares de hojas.

En este sentido, consideramos que puede resultar útil la incorporación de herramientas informáticas o plataformas de gestión documental que faciliten la trazabilidad del proceso desde que se inicia la elaboración del EsIA hasta que termine el proceso, incluyendo las elaboraciones del respectivo EsIA, la decisión tomada por la autoridad ambiental y las labores de seguimiento que se realicen.

.....

Dificultades que aborda

Todas las fuentes de incertidumbre

Partes del proceso a las que aplicaría

Todo el proceso de EIA

Tabla 1: Listado de lineamientos metodológicos

#	Nombre del lineamiento	Dificultades que aborda	Partes del proceso en las que aplicaría
1	Incorporación de criterios ambientales en la planeación de proyectos	<ul style="list-style-type: none"> - Sensibilidad a las condiciones iniciales - Falta de correspondencia de los modelos con las características de los sistemas complejos 	Etapa de Planeación
2	Uso de modelos adecuados para la descripción del ambiente en el área de influencia	<ul style="list-style-type: none"> - Falta de correspondencia de los modelos con las características de los sistemas complejos 	2. Elaboración de DAA 4. Selección de alternativa 5. Elaboración de EsIA 7. Evaluación de EsIA
3	Uso de niveles y tendencias asociadas a factores ambientales	<ul style="list-style-type: none"> - Falta de correspondencia de los modelos con las características de los sistemas complejos 	5.1 Elaboración de línea base 5.2 Identificación de factores ambientales 5.5 Valoración de impactos ambientales
4	Análisis de la importancia de impactos ambientales orientados a facilitar el diseño y aplicación de PMAs	<ul style="list-style-type: none"> - Falta de correspondencia de los modelos con las características de los sistemas complejos. 	5.5 Valoración de impactos ambientales 5.9 Elaboración de PMA 7 Evaluación de EsIA
5	Uso de modelos matemáticos formales para el tratamiento de información cualitativa y cuantitativa	<ul style="list-style-type: none"> - Valoraciones cualitativas y cuantitativas - Información imprecisa 	5.5 Valoración de impactos ambientales
6	Justificación de indicadores, parámetros y atributos utilizados	<ul style="list-style-type: none"> - Subjetividad - Intencionalidad - Sensibilidad a los parámetros del modelo 	5.4 Identificación de impactos ambientales 5.5 Valoración de impactos ambientales
7	Fortalecimiento de la etapa de Seguimiento y Control	<ul style="list-style-type: none"> - Sensibilidad a las condiciones iniciales - Fenómenos aleatorios 	Etapa de Seguimiento y Control
8	Conformación de equipos con enfoque interdisciplinario	<ul style="list-style-type: none"> - Falta de correspondencia de los modelos con las características de los sistemas complejos 	Todo el proceso de EIA
9	Empleo de mecanismos de participación efectivos	<ul style="list-style-type: none"> - Incertidumbre interna en las descripciones realizadas 	Todo el proceso de EIA
10	Fortalecimiento del Sistema de Información Ambiental de Colombia - SIAC	<ul style="list-style-type: none"> - Contexto en el que se usa el modelo - Incertidumbre en las descripciones realizadas - Información errónea 	Todo el proceso de EIA
11	Implementación de mecanismos de trazabilidad	Todas	Todo el proceso de EIA

Fuente: Elaboración propia

2.5 Conclusiones

A lo largo de este trabajo hemos establecido que hablar del proceso de EIA implica el modelamiento de un sistema complejo y la descripción de fenómenos o situaciones a partir de información imperfecta. Por lo tanto, resulta importante considerar los planteamientos teóricos que se han desarrollado bajo la sombra de la Teoría de la Complejidad y sus correspondientes implicaciones prácticas.

En este sentido, pensando en mejorar el proceso de EIA y los EsIA - el objetivo implícito de este trabajo de investigación - concluimos que existe la necesidad de incorporar el concepto de incertidumbre. Como lo hemos mencionado anteriormente, esto amerita acciones en dos sentidos: i) reconocer la imposibilidad de eliminar todas las fuentes de incertidumbre formalizando aquellas que, al menos de momento, resultan irreducibles y ii) reducir aquellas incertidumbres que sean susceptibles de reducción por medio del refinamiento de los modelos y descripciones que se elaboren y utilicen.

En relación con el primer aspecto, podría argumentarse que esta condición es la misma que existe en cualquier problema de modelamiento: por definición, los modelos son sólo aproximaciones; sin embargo, hablar de la predicción de impactos ambientales como un fenómeno complejo significa reconocer que en este caso nuestra capacidad de predicción resulta bastante más limitada que cuando se trata de fenómenos no complejos.

Desafortunadamente, como evidenciamos al formular los lineamientos metodológicos, la forma en que se ha venido desarrollando el proceso de licenciamiento ambiental en el país pareciera desconocer esta realidad. Ejemplos que nos permiten hacer esta afirmación son la alta flexibilidad en el tiempo para hacer efectiva una licencia ambiental desde el momento de su otorgamiento, la baja importancia que parecieran tener las actividades de Seguimiento y Control y los altos niveles de intencionalidad y/o subjetividad sin justificación técnica alguna identificados por Martínez (2013).

De otra parte, esta primera limitante podría ser mitigada mediante el refinamiento, conforme el avance del conocimiento científico así lo permita, de los modelos que construimos para describir el comportamiento del sistema ambiente así como de las descripciones que realicemos de ciertas situaciones de interés. Una vez más, este escenario pareciera estar lejos de la situación de los modelos y métodos en los que se basa el proceso de EIA en el país.

Aunque, como lo ha señalado la CGR (2012), serían deseables estudios que permitan determinar el nivel de precisión de las predicciones realizadas actualmente en el país en los EsIA, al menos teóricamente, podemos concluir que existen grandes retos a la hora de modelar de manera precisa - tan precisa como sea posible - impactos sobre el ambiente como consecuencia de cierto proyecto.

Basta con pensar en el modelo matemático propuesto por Conesa para la valoración de la importancia de impactos ambientales. Aunque esta ecuación utiliza como insumo valoraciones realizadas por expertos que pueden basarse implícitamente en modelos

matemáticos más complejos que informen su juicio, consideramos que la complejidad del fenómeno con el que se está trabajando es tal que amerita que, por ejemplo, se involucren directa y explícitamente otro tipo de modelos matemáticos que tengan una mayor grado de representatividad con el ambiente.

Con base en estos planteamientos básicos para incorporar el concepto de incertidumbre, a lo largo de este capítulo expusimos el resultado del proceso de construcción de un conjunto de lineamientos metodológicos, que sirven de guía a la hora de aplicar a la EIA las implicaciones prácticas de los fundamentos teóricos a los que corresponde el primer capítulo de este trabajo de investigación. Fruto de este proceso resultó evidente, en primer lugar, lo que pareciera ser un desconocimiento generalizado de estas implicaciones por parte de todos los actores involucrados en el proceso.

Prueba de este aparente desconocimiento es que la responsabilidad de aplicar los lineamientos propuestos recaiga sobre varios de los actores involucrados, como lo son los responsables de elaborar o evaluar los EsIA, los proponentes de los proyectos, las autoridades en materia ambiental, la comunidad académica y la comunidad en general que pueda resultar afectada por los proyectos sujetos a licenciamiento ambiental. Sin desconocer la responsabilidad de cada actor en el mejoramiento del proceso de EIA, consideramos particularmente importante resaltar el papel que deben jugar las autoridades ambientales, toda vez que es su función velar porque el proceso de licenciamiento en el país sea una herramienta para gestionar adecuadamente el patrimonio ambiental de la nación.

Asimismo, pese a que partimos de enfocarnos principalmente en la valoración de impactos ambientales, llama nuestra atención que conforme avanzó el proceso de construcción de estos lineamientos se hizo evidente la pertinencia de formular lineamientos aplicables a otras actividades dentro del proceso, a otras de sus etapas e incluso algunos que corresponde implementar a lo largo de todo el proceso de EIA.

Ahora bien, aunque los lineamientos propuestos son una guía teórica que deben ser considerados para el diseño y/o ajuste del proceso de EIA y los métodos que se utilicen dentro de él, somos conscientes de que aún resta por explorar con mayor nivel de detalle las posibles herramientas (del mecanicismo, de la complejidad y de todo el conocimiento científico) que permitirían llevarlos a la práctica. En este sentido, al momento de presentar los lineamientos metodológicos nos permitimos señalar algunas ideas preliminares de métodos de implementación que pueden convertirse en temas para investigaciones futuras.

De cualquier manera, los aspectos prácticos y metodológicos del proceso de EIA, independientemente de la herramienta que se determine como apropiada para la implementación de cada lineamiento (y de otros que hayan escapado a nuestro análisis), deben estructurarse tomando como principio, valga la redundancia, los principios de prevención y precaución. De esta forma, consideramos prioritario insistir en que el proceso de EIA no debe ser entendido como un mero trámite administrativo que culmina con el otorgamiento de una licencia ambiental. Por el contrario, debe tenerse presente que este proceso bien puede finalizar con una decisión negativa respecto de la solicitud, como resultado de un proceso de toma de decisión sesgado en favor de dichos principios.

Hasta tanto la concepción del proceso no cambie, la EIA y los EsIA no servirán como herramientas que podamos usar con el objetivo de transformar “bien” nuestro entorno, contribuyendo así a la solución de las problemáticas ambientales en los términos expuestos por Maya (1995).

3. Aportes, Discusión y Trabajos Futuros

3.1 Aportes

A continuación enunciamos los principales aportes de investigación.

1. Un marco teórico para el análisis del concepto de incertidumbre en fenómenos complejos. La utilidad de este marco teórico se hace evidente en aportes más puntuales como lo son:
 - a. Reseña de algunos de los avances científicos más relevantes relacionados con la predicción de fenómenos complejos
 - b. Claridad conceptual de términos como “sistema complejo”, “comportamiento caótico” e “información imperfecta”
2. Identificación y propuesta de clasificación de potenciales fuentes de incertidumbre cuando se modelan y predicen fenómenos complejos. La importancia de este listado y su clasificación correspondiente radica en que, así como en este trabajo lo aplicamos al caso de la EIA, también puede utilizarse para analizar el modelamiento de otros fenómenos complejos.
3. Conceptualización del proceso de EIA aplicando el modelo genérico de Entrada-Salida particularmente al caso del análisis de la incorporación del concepto de incertidumbre. Precisamente, esta conceptualización fue la que facilitó la identificación y clasificación de las fuentes de incertidumbre mencionadas.
4. Ilustración mediante ejemplos de lo que implica hablar del ambiente como un sistema complejo. Esta ilustración puede contribuir a esclarecer el discurso ambiental al permitir establecer vínculos claros con los desarrollos bases teóricas que preceden al concepto.
5. Modelamiento mediante un esquema gráfico de las etapas y actividades que deben surtir a lo largo del proceso de EIA. Si bien en la literatura consultada existen algunos esquemas del proceso de EIA, en nuestra propuesta de esquema incluimos también las actividades que deben realizarse en el marco de la elaboración de un EsIA.
6. Identificación de momentos y formas a lo largo del proceso de EIA en los que se pueden manifestar las fuentes de incertidumbre.
7. Argumentación de la importancia de aplicar el Principio de Precaución a lo largo de todo el proceso de EIA.
8. Conjunto de lineamientos metodológicos para la incorporación del concepto de incertidumbre en la EIA.
9. Análisis preliminar de la forma como se realiza el proceso de EIA actualmente en el país para cada uno de los lineamientos propuestos.

3.2 Discusión

Esta sección reúne algunos elementos de reflexión que me siento obligado a exponer (nótese la primera persona) y que no tienen sustento más allá del aprendizaje que he construido a lo largo de mi vida académica y mi experiencia profesional. Por lo tanto, no deben ser tomados como más que eso; ideas que, con suerte, generarán en el lector una reflexión acerca de su quehacer como ser humano.

En primer lugar, debo decir que las enseñanzas que me ha dejado este trabajo plantean una paradoja que sospecho puedo generalizar al conjunto de la actividad científica. Pareciera ser que conforme alguien logra conocer un poco más acerca de la forma como funciona (o como creemos que funciona) la realidad en la que vivimos, también crece, quizás en una proporción mayor, el número de cosas que esa persona es consciente que desconoce.

En general (alejándome de los objetivos que orientaron esta investigación), este trabajo me dejó dos grandes enseñanzas. En primer lugar, el aprendizaje de que muchos de los fenómenos con los que nos encontramos a diario (la forma como interactuamos en los grupos sociales de los que hacemos parte, nuestros procesos de aprendizaje y la predicción del estado del tiempo, entre muchos otros) son complejos en el sentido que expresamos previamente. Por otro lado, la necesidad de reconocer que, al menos con el avance actual de la ciencia, nuestra capacidad de modelamiento, predicción y control de este tipo de fenómenos es limitada; de hecho, mucho más limitada de lo que estamos acostumbrados a aceptar.

Por supuesto, al vivir en un mundo mayoritariamente basado en las ventajas comparativas y en el afán de aumentar la producción y los ritmos de compra y venta, reconocer esta realidad puede ser interpretado como un signo de debilidad, ineficiencia e incluso incompetencia. Por el contrario, este trabajo está lleno de argumentos que permiten justificar la adopción de una posición bastante más humilde y, de paso, más responsable respecto a nuestro quehacer como seres humanos. Considere los siguientes ejemplos; el primero muy a propósito del entorno social en Colombia y los demás relacionados con cuestiones ambientales en general.

Los discursos de algunos dirigentes políticos y las expectativas que generan en nosotros. Quizás, en parte como resultado de la actitud pasiva de muchos de nosotros, nos hemos acostumbrado a esperar que de estos dirigentes provengan ideas salvadoras que logren cambiar radicalmente el comportamiento del sistema del que hacemos parte. Basta con verlos en campaña afirmando (casi con descaro) que son ellos los indicados para realizar los cambios que tanto anhelamos, desconociendo (o al menos aparentando que lo desconocen) que el comportamiento del sistema que buscan cambiar depende de muchos factores, la mayoría de los cuales están fuera de su control.

¿Realmente creemos que un alcalde podrá solucionar los problemas de movilidad o de seguridad de una ciudad? ¡No! Cuando mucho podrá aportar a cambios cuya implementación empezó años antes de su periodo de mandato y, por suerte, empezarán a producir cambios significativos en el comportamiento del sistema durante su periodo. En caso de que tales cambios no hayan iniciado para el momento de su llegada a la

dirección de la ciudad, el mandatario no podrá hacer más (asumiendo que conoce la forma de generar estos cambios trascendentales en el sistema) que iniciar con la implementación de ciertas medidas que, de ser continuadas por sus sucesores, eventualmente darán el resultado deseado.

En cualquier caso, considero que resulta bastante irresponsable publicitarse como el mesías que logrará “enderezar” el rumbo de una ciudad o, de ser el caso, del país.

Un poco más directamente relacionado con cuestiones ambientales, considere el argumento que usó el expresidente estadounidense George W. Bush en el año 2001 al momento de rechazar la firma del protocolo de Kyoto: “nadie puede decir con certeza qué constituye un nivel de calentamiento peligroso y, por tanto, qué nivel debe ser evitado” [Traducción propia] (O’Neill & Oppenheimer, 2002, citados en Farber, 2003). Además de una postura arrogante, se hace evidente un (aparente) desconocimiento de la complejidad que caracteriza al sistema climático mundial y una ausencia absoluta del Principio de Precaución, cuya pertinencia ya había sido demostrada para entonces.

En este mismo sentido, considere la siguiente situación. Tal y como lo demuestran los informes más recientes del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), ya existe consenso entre la mayoría de los científicos acerca de que el principal causante del fenómeno de cambio climático actual es la actividad humana de las últimas décadas. Dentro de esta actividad, las acciones asociadas a la quema de combustibles fósiles juegan un papel muy importante, por cuenta de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) que implican.

Teniendo en cuenta las graves consecuencias que han traído los fenómenos asociados al cambio climático y los preocupantes escenarios que ha planteado el IPCC, llama la atención la posición de las compañías multinacionales petroleras. Como ejemplo considere el caso particular de la empresa estadounidense ExxonMobile que reduce el problema a uno de capacidad de adaptación de los seres humanos. Así lo evidencian las declaraciones de uno de sus ejecutivos más importantes, el señor Rex Tillerson, reseñadas ampliamente por medios de comunicación⁷⁰:

“Hemos gastado nuestra existencia entera adaptándonos. Nos adaptaremos. (...) Es un problema de ingeniería y habrá una solución ingenieril.” [Traducción propia]

Las declaraciones del señor Tillerson permiten inferir algunas cosas. Por un lado, la expresión de arrogancia se hace evidente, una vez más, al interpretar la afirmación del alto ejecutivo de la petrolera como una predicción de que el fenómeno del cambio climático en realidad no representa una amenaza para la supervivencia de los seres humanos. Asimismo, vale la pena resaltar que, contrario a la convicción del señor Tillerson, nadie puede garantizar el tipo ni la magnitud de las consecuencias que en unas décadas nos veremos obligados a afrontar (cambios forzosos del lugar de residencia, del

⁷⁰ <http://in.reuters.com/article/2012/06/27/exxon-climate-idINL2E8HRA8K20120627>
<http://www.theguardian.com/environment/2012/jun/28/exxonmobil-climate-change-rex-tillerson>

tipo de cultivos y pérdida masiva de biodiversidad y de los beneficios que esta representa para los seres humanos, entre otros) por cuenta de este fenómeno climático.

Aun así, en el hipotético escenario en que la muy infundada predicción del señor Tillerson se volviera realidad, es altamente probable que esta capacidad de adaptación sea bastante más elusiva para aquellas personas que se encuentren en condición de vulnerabilidad. ¿Dónde queda la responsabilidad del señor Tillerson al hacer semejante afirmación tan temeraria?

Encontrar soluciones cuando se trata con problemas ambientales no es una tarea sencilla. En este sentido, llama la atención que el ejecutivo de la petrolera deje en manos de la ingeniería la búsqueda de estas soluciones. Una ingeniería que, al menos en mi experiencia al haber estudiado recientemente en una de las universidades más importantes del país un pregrado en una de las ramas de la ingeniería, aún está en deuda de incorporar aspectos ambientales dentro de sus programas de información.

Por supuesto, la crítica no se puede limitar exclusivamente a la ingeniería. En general, pareciera ser que los programas educativos formales no aportan criterios ambientales para la toma de decisiones en el ejercicio de la vida profesional de sus egresados. Lo realmente preocupante es que al no incorporar de manera transversal la discusión de estos aspectos se está obviando la explicación de características esenciales del funcionamiento de la realidad en la que vivimos. Como hemos mencionado en repetidas ocasiones, no es viable que sigamos viviendo asumiendo que contamos con recursos ilimitados.

Por el contrario, la educación bien podría usarse como un gran escenario que, al incorporar aspectos ambientales, sea la plataforma para implementar, al mejor estilo de los sistemas, lazos de realimentación que nos hagan conscientes de las consecuencias de nuestras actividades en el planeta y, por ende, nos lleven a adoptar conductas más responsables.

Con las opiniones expuestas previamente - y, de hecho, con todo el trabajo - no pretendo desconocer la existencia de otros puntos de vista, ni imponer una "visión ambientalista" de la realidad. Simplemente busco aportar elementos de reflexión acerca de nuestra forma de actuar. Como bien lo señaló Meadows (2009), existen razones morales y prácticas para aprender a vivir rodeado, y como parte, de sistemas complejos (p. 184):

"El sistema real es interconectado. Ningún ser humano está desconectado de otros seres humanos o del ecosistema global. No es posible en un mundo interconectado que su corazón funcione adecuadamente si sus pulmones fallan, o que su compañía sea exitosa si sus trabajadores no lo son, o que los ricos de Los Ángeles tengan éxito si los pobres de Los Ángeles no lo tienen, o que Europa prospere si África no lo hace, o que la economía global sea exitosa si el ambiente no prospera.

Como sucede con todo lo demás acerca de los sistemas [complejos], la mayoría de gente ya conoce las interconexiones que hacen que las razones prácticas y morales sean las mismas". [Traducción propia]

3.3 Propuestas para trabajos futuros

Este trabajo aporta elementos para la incorporación de la incertidumbre en el proceso de EIA; sin embargo, como ya hemos mencionado, son necesarios trabajos complementarios que faciliten la aplicación de los diferentes lineamientos metodológicos propuestos. A continuación presentamos algunas ideas preliminares que podrían dar inicio a nuevos trabajos de investigación que profundicen o amplíen la investigación relacionada con el concepto de incertidumbre y la EIA.

En primer lugar, algunas de estas ideas que tienen que ver directamente con el refinamiento de modelos que se usan a lo largo del proceso de EIA son:

- Incorporación formal de métodos y modelos de análisis propios de los sistemas dinámicos en la EIA. Aracil (1996) y Levine (1996) proporcionan algunos ejemplos que pueden ser un buen punto de partida.
- Análisis de las herramientas matemáticas avanzadas que brindan la Teoría de la Evidencia, la Teoría de la Posibilidad y la Teoría de la Probabilidad para la predicción en escenarios de incertidumbre. Algunos ejemplos son la Teoría Generalizada de la Incertidumbre propuesta por Zadeh (2005) y el análisis estadístico basado en leyes de potencia las cuales, según Farber (2003), son las distribuciones estadísticas características de los sistemas complejos.
- Análisis estadístico de series de tiempo aplicadas a los factores ambientales. Según Berliner (1991), este tipo de análisis puede ser muy fructífero a la hora de entender e identificar comportamientos caóticos que pueden presentar los sistemas complejos.
- Aplicación de modelos computacionales basados en agentes o en algoritmos genéticos. Phelan (2001) y Johnson (2007) señalan algunos éxitos en su utilización cuando se trata de predecir el comportamiento de sistemas complejos.
- Evaluación de la pertinencia de métodos cualitativos y cuantitativos para el tratamiento de información imperfecta. Un buen punto de partida puede ser el compendio de métodos expuesto por Parsons (2001).
- Identificación de niveles y tendencias asociadas a factores ambientales. Los trabajos de Johnson (2007) y Meadows (2009) pueden aportar importantes elementos teóricos y conceptuales para la definición e identificación de dichos indicadores, mientras que el trabajo de Toro (2009) muestra un ejemplo claro de una forma de incorporarlos.
- Establecimiento de mecanismos que permitan, a partir de la identificación y valoración de impactos realizada, incorporar en los PMAs medidas orientadas a fortalecer la resiliencia del ambiente. Meadows (2009) aporta criterios importantes a la hora de definir puntos efectivos de intervención en sistemas complejos.

En relación con la evaluación de las herramientas que se vienen utilizando recientemente vale la pena considerar:

- Establecimiento del nivel de incertidumbre presente en las predicciones hechas en los EsIA realizados en los últimos años en el país. El trabajo de Tennøy et al. (2006) puede ser un referente importante.

- Evaluación de la efectividad de las metodologías utilizadas para el desarrollo de procesos de participación como las sesiones de socialización, audiencias públicas y consultas previas.
- Análisis del nivel y mecanismos de aplicación de los principios de prevención y precaución a lo largo del proceso de licenciamiento ambiental.
- Evaluación de la eficacia de los mecanismos utilizados para realizar Seguimiento y Control.

Por último, algunas investigaciones que aportarían insumos muy valiosos para apoyar el proceso de EIA son:

- Diseño de metodologías para incorporación de criterios ambientales a lo largo de la etapa de planeación de los proyectos.
- Desarrollo de trabajos de investigación que permitan levantar y/o validar la información ambiental en todo el país, en el marco del fortalecimiento del SIAC liderado por el estado.
- Análisis de herramientas informáticas o plataformas tecnológicas que faciliten la sistematización de toda la información generada y/o utilizada dentro del proceso de EIA.
- Revisión de la normativa vigente a partir del marco teórico de este trabajo de investigación y de otros estudios relevantes. Consideramos particularmente importante la regulación de la etapa de planeación y la revisión de aspectos como el amplio periodo de tiempo del que dispone el titular de una licencia ambiental para hacerla efectiva antes de que sea revocada y la frecuencia con la que se realizan visitas de seguimiento a los proyectos.

4. Bibliografía

- Alderson, D. L., & Doyle, J. C. (2010). Contrasting views of complexity and their implications for network-centric infrastructures. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 40(4), 839-852.
- Aracil, J. (1996). *Dinámica de sistemas*. Madrid, España: Isdefe - Ingeniería de sistemas.
- Bar-Yam, Y. (1997). *Dynamics of complex systems* (Vol. 213). Reading, MA: Addison-Wesley.
- Baranger, M. (2000). Chaos, Complexity, and Entropy. A physics talk for non-physicists. Center for Theoretical Physics, Laboratory for Nuclear Science and Department of Physics Massachusetts Institute of Technology y New England Complex Systems Institute, Cambridge, U.S.A.
- Barrow-Green, J. (1996). Poincaré and the Three Body Problem. *History of Mathematics*, 11.
- Barton, S. (1994). Chaos, self-organization, and psychology. *American Psychologist*, 49(1), 5.
- Berliner, L. M. (1991). Likelihood and Bayesian prediction of chaotic systems. *Journal of the American Statistical Association*, 86(416), 938-952.
- Bertalanffy, L. V. (1968). *General system theory: Foundations, development, applications*. New York: Braziller.
- Bodansky, D. (1991). Scientific uncertainty and the precautionary principle. *Environment*, 33 (7), 4-5, 43-44.
- Bryce, R. (2011). *Power Hungry: The Myths of "Green" Energy and the Real Fuels of the Future*. PublicAffairs.
- Buckle Henning, P., & Chen, W. C. (2012). Systems thinking: Common ground or untapped territory? *Systems Research and Behavioral Science*, 29(5), 470-483.
- Callon, M., Lascoumes, P. & Barthe, Y. (2009). *Acting in an uncertain world: An essay on technical democracy*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.

- Capra, F. (1992). *El punto crucial: ciencia, sociedad y cultura naciente*. Buenos Aires, Argentina: Troquel.
- CGR. (2012, abril). *Función de Advertencia proferida por la Contraloría General de la República con el fin de advertir sobre los riesgos de daño ambiental derivados del proceso de licenciamiento ambiental*.
- Checkland, P. (1993). *Pensamiento de sistemas, práctica de sistemas*. México D.F.: Editorial Limusa.
- Cho, A. (2009). *Ourselves and Our Interactions*. *Science*, 325, pp. 406 – 408.
- Choi, Y. B. (1993). *Paradigms and conventions: Uncertainty, decision making and entrepreneurship*. Ann Arbor, Michigan, Estados Unidos: The University of Michigan Press.
- COMEST, U. (2005). *The precautionary principle*. Comisión Mundial de Ética del Conocimiento Científico y la Tecnología (COMEST), Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), Paris.
- Conkin, P. (2006). *The state of the earth: Environmental challenges on the road to 2100*. University Press of Kentucky.
- Dey, A. K. (2001). *Understanding and using context*. *Personal and ubiquitous computing*, 5(1), 4-7.
- DNP (2013). *Evaluación de operaciones al proceso de licenciamiento ambiental en sus etapas de planeación, evaluación y seguimiento, desarrollados por las entidades encargadas del sector, los peticionarios y las autoridades ambientales*. Informe final.
- Duarte, O. (2000). *Técnicas Difusas en la Evaluación de Impacto Ambiental* (Tesis inédita de doctorado). Universidad de Granada, Granada, España.
- Farber, D. A. (2003). *Probabilities Behaving Badly: Complexity Theory and Environmental uncertainty*. *University of California, Davis, Law Review*, 37 (1), 145 - 173.
- Firth, W. J. (1991). *Chaos: predicting the unpredictable*. *British Medical Journal*, 303 (6817), 1565 - 1568.
- Fox, L. (Productor). (2007). *La historia de las cosas [Documental]*. Estados Unidos: Free Range Studios.
- Frölicher, T. L., Winton, M., & Sarmiento, J. L. (2014). *Continued global warming after CO2 emissions stoppage*. *Nature Climate Change*, 4(1), 40-44.
- Garmendia, A., Salvador, A., Crespo, C., & Garmendia, L. (2005). *Evaluación de Impacto Ambiental*. (p. 75.). Madrid: Pearson education.

- Girón, F. J. (2001). Determinismo, caos, azar e incertidumbre. En Horizontes culturales: las fronteras de la ciencia (pp. 73 - 83). España: Espasa Calpe.
- Goldstein, B. D. (2012). John Snow, the broad street pump and the precautionary principle. *Environmental Development*, 1(1), 3-9.
- Gutzwiller, M. C. (1998). Moon-Earth-Sun: The oldest three-body problem. *Reviews of Modern Physics*, 70(2), 589.
- Harremoës, P., Gee, D., MacGarvin, M., Stirling, A., Keys, J., Wynne, B., Guedes, S. (2001). Late lessons from early warnings: the precautionary principle 1896-2000. Office for Official Publications of the European Communities.
- Holden, A. (Ed.) (1986). *Chaos - Nonlinear Science. Theory and Applications*. Manchester, UK: Manchester University Press.
- IOM (Institute of Medicine). (2013). *Environmental Decisions in the Face of Uncertainty*. Washington: The National Academies Press.
- Jay, S., Jones, C., Slinn, P. & Wood, C. (2007). Environmental impact assessment: Retrospect and prospect. *Environmental Impact Assessment Review*, 27, 287 - 300.
- Johnson, N. (2007). *Simply complexity. A clear guide to complexity theory*. Oxford, England: OneWorld Publications.
- Kamal, A. M. & Burkell, J. (2011). Addressing uncertainty: when information is not enough. *The Canadian Journal of Information and Library Science*, 35 (4), 384 - 396.
- King, J. B. (1989). Confronting chaos. *Journal of Business Ethics*, 8(1), 39-50.
- Kirkup, L. & Frenkel, B. (2006). *An introduction to uncertainty in measurement using the GUM*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press.
- Klir, G., & Yuan, B. (1995). *Fuzzy sets and fuzzy logic (Vol. 4)*. New Jersey: Prentice Hall.
- Levine, W. S. (Ed.). (1996). *The control handbook*. CRC press.
- Leys, J., Ghys, E. & Alvarez, A. (Productores). (2013). *Chaos [Documental]*. www.chaos-marth.org
- Lindley, D. V. (2006). *Understanding Uncertainty*. Minehead, Somerset, England: Wiley-Interscience.
- Ljung, L. (1987). *System identification: theory for the user*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.
- Ljung, L., & Glad, T. (1994). On global identifiability for arbitrary model parametrizations. *Automatica*, 30(2), 265-276.

- Loucks, D. P., Van Beek, E., Stedinger, J. R., Dijkman, J. P., & Villars, M. T. (2005). *Water resources systems planning and management: an introduction to methods, models and applications*. Paris: UNESCO.
- Lubinski, J. W. (1998). *Ideas sobre la complejidad del mundo*. Barcelona, España: Tusquets Editores.
- Martínez, L. F. (2013). *Análisis de la Incertidumbre en los Estudios de Impacto Ambiental en Colombia desde el Enfoque de los Sistemas Complejos* (Tesis inédita de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- MADS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible). (2015) Decreto 1076 de 2015. Por medio del cual se expide el Decreto único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Matlock, J. & Taylor, F. (Productores ejecutivos). (2009). *The quantum tamers: revealing our weird & wired future*. Canada: Perimeter Institute for Theoretical Physics.
- May, R. M. (1976). Simple mathematical models with very complicated dynamics. *Nature*, 261(5560), 459-467.
- Maya, A. A. (1995). *Desarrollo sostenible: aproximaciones conceptuales*. Quito, Ecuador: Fundación Natura.
- Maya, A. A. & Ángel, F. (2002). La Fuga hacia la incertidumbre. Más allá de la Modernidad o de la Postmodernidad. *Ecofondo*, 23.
- Meadows, D. H. (2009). *Thinking in systems: a primer*. London, U.K.: Earthscan.
- Motro, A., & Smets, P. (Eds.). (1997). *Uncertainty management in information systems: from needs to solutions*. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- O'Connor, J. J. & Robertson, E. F. (2006, Agosto). Ernst Heinrich Bruns [Publicación Web]. Recuperado de: <http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Bruns.html>
- O'Hagan, T. (2004). Dancing with the unknown. *Significance*, 1 (2), 132 - 133.
- Odum, E. & Barrett, G. (2006). *Fundamentos de Ecología* (5ta ed.). México: Thomson.
- Ou Yang, S., Lin, Y. (2011). Problems with Lorenz's Modeling and the Algorithm of Chaos Doctrine. En E. Zeraoulia & J. C. Sprott (eds.), *Frontiers in the Study of Chaotic Dynamical Systems with Open Problems*, (pp. 1 - 29). Singapur: World Scientific.
- Pain, E. (2010, diciembre). Bridging the Quantum and the Classical Worlds [Publicación web]. Recuperada de: http://sciencecareers.sciencemag.org/career_magazine/previous_issues/articles/2010_12_17/caredit.a1000120

- Parsons, S. (2001). *Qualitative methods for reasoning under uncertainty* (Vol. 13). MIT Press.
- Peche, R., & Rodríguez, E. (2009). Environmental impact assessment procedure: A new approach based on fuzzy logic. *Environmental Impact Assessment Review*, 29, 275 – 283.
- Phelan, S. E. (2001). What is complexity science, really? *Emergence, A Journal of Complexity Issues in Organizations and Management*, 3(1), 120-136.
- Presidencia de la República. (2015). Ley 1753 de 2015 por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2014 – 2018 “Todos por un nuevo país”.
- Rojas, C. (2006). *La filosofía: sus transformaciones en el tiempo*. San Juan, Puerto Rico: Isla Negra Editores.
- Ross, W. D. (2014). Trad. Aristotle, *Nicomachean Ethics*. The University of Adelaide Library.
- Schmidt, G. (2014, marzo). The emergent patterns of climate change [video]. Recuperado de:
https://www.ted.com/talks/gavin_schmidt_the_emergent_patterns_of_climate_change?language=es
- Serway, R., & Jewett, J. (2005). *Física para ciencias e ingenierías* (Vol. 2). México: Editorial Thomson.
- Smets, P. (1997). Imperfect information: Imprecision and uncertainty. En *Uncertainty Management in Information Systems* (pp. 225-254). Springer US.
- Smith, P. (1998). *Explaining chaos*. Cambridge University Press
- Smitherman, S. (2004). *Chaos and Complexity Theories: Creating Holes and Wholes in Curriculum*. Conferencia presentada en la reunión anual de la Asociación Americana para la Investigación en Educación (AERA, por sus siglas en inglés).
- Tacnet, J. M., Dezert, J., Curt, C., Batton-Hubert, M., & Chojnacki, E. (2014). How to manage natural risks in mountain areas in a context of imperfect information? New frameworks and paradigms for expert assessments and decision-making. *Environment Systems and Decisions*, 34(2), 288-311.
- Tannert, C., Elvers, H. D. & Jandrig, B. (2007). The ethics of uncertainty. *EMBO (European Molecular Biology Organization) reports*, 8 (10), 892 - 896.
- Tangen, J. (2014, marzo). *Think 101: The science of everyday thinking*. MOOC realizado por The University of Queensland a través de la plataforma edX. Australia.
- Tennøy, A, Kværner, J., Gjerstad, K. I. (2006). Uncertainty in environmental impact assessment predictions: the need for better communication and more transparency. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 24 (1), 45 - 56.

- Toro, J. (2009). Análisis constructivo del proceso de Evaluación de Impacto Ambiental en Colombia. Propuestas de mejora (Tesis inédita de doctorado). Universidad de Granada, Granada, España.
- Toro, J., Duarte, O., Requena, I., & Zamorano, M. (2012). Determining vulnerability importance in environmental impact assessment: The case of Colombia. *Environmental impact assessment review*, 32(1), 107-117.
- Toro, J., Requena, I. & Zamorano, M. (2010). Environmental impact assessment in Colombia: Critical analysis and proposals for improvement. *Environmental Impact Assessment Review*, 30, 247 - 261.
- Waldrop, M. M. (1993). *Complexity: The emerging science at the edge of order and chaos*. Simon and Schuster.
- Weaver, W. (1948). Science and complexity. *American Scientist*, 36, 536-544.
- You, Y. (1993). What can we learn from chaos theory? An alternative approach to instructional systems design. *Educational Technology Research and Development*, 41(3), 17-32.
- Zadeh, L. (1973). Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. *IEEE Transactions on systems, man and cybernetics*, SMC-3 (1), 28 - 44.
- Zadeh, L. (2005). Toward a generalized theory of uncertainty (GTU)—an outline. *Information sciences*, 172, pp. 1 – 40.
- Zadeh, L. (2015). Fuzzy logic - a personal perspective. *Fuzzy Sets and Systems*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.fss.2015.05.009>.