



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE HUANTA



FONDO
EDITORIAL



DAÑO AMBIENTAL

Karina Milagros Ordóñez Ruiz
Luis Alberto Ordóñez Ruiz
Luis Alberto Ordóñez Sánchez



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE HUANTA
VICEPRESIDENCIA DE INVESTIGACIÓN



FONDO
EDITORIAL

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HUANTA

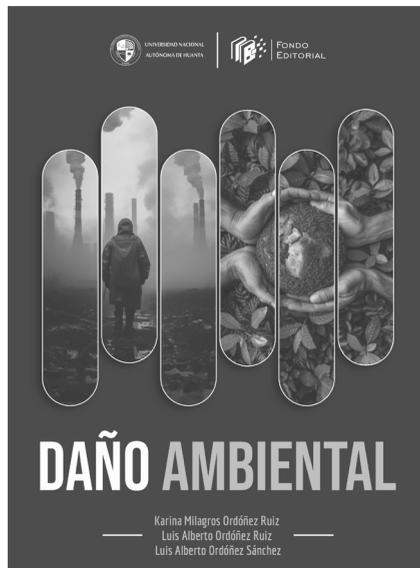
DAÑO AMBIENTAL

KARINA MILAGROS ORDÓÑEZ RUIZ

LUIS ALBERTO ORDÓÑEZ RUIZ

LUIS ALBERTO ORDÓÑEZ SÁNCHEZ

DAÑO AMBIENTAL



Título: Daño Ambiental

Autores:

©Karina Milagros Ordóñez Ruiz

©Luis Alberto Ordóñez Ruiz

©Luis Alberto Ordóñez Sánchez

Editado por:

©Universidad Nacional Autónoma de Huanta, Fondo Editorial. Jr. Manco Cápac No 497, El Bosque, local administrativo, Huanta, Ayacucho - Perú.

1ª edición Digital – mayo 2025

124 pp.; 17x23cm

Version Digital

**HECHO EL DEPÓSITO LEGAL EN LA BIBLIOTECA NACIONAL
DEL PERÚ N° 2025-05234**

ISBN: 978-612-99039-0-3

Libro electrónico disponible en: <https://fondoeditorial.unah.edu.pe>

DOI: <https://doi.org/10.37073/feunah.54>

Proceso de Revisión

Fue revisado por pares externos en modalidad de doble ciego. autorizado para publicar con Resolución de Vicepresidencia de Investigación N° 026-2025-UNAH

Revisor A: Dr. Guillermo Vásquez Ramírez

Revisor B: Dr. Williams Ramirez Navarro.

Diseño de cubierta y diagramación de interiores

Antony Aguilar-Ozejo

Publicado en el Perú / Published in Peru

Todos los derechos reservados. Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra, sin autorización escrita del autor.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HUANTA

Publicación del libro:
DAÑO AMBIENTAL

KARINA MILAGROS ORDÓÑEZ RUIZ
LUIS ALBERTO ORDÓÑEZ RUIZ
LUIS ALBERTO ORDÓÑEZ SÁNCHEZ

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	11
CAPÍTULO I.....	15
AMBIENTE	15
CAPÍTULO II	25
ECOSISTEMA.....	25
CAPÍTULO III	37
CICLOS BIOGEOQUÍMICOS	37
1. El ciclo del carbono	41
2. El ciclo del nitrógeno	45
3. El ciclo del azufre	46
4. El ciclo del fósforo.....	48
CAPÍTULO IV	55
DAÑO AMBIENTAL.....	55
CAPÍTULO V	71
LA RELACIÓN DE CAUSALIDAD	71
1. Teorías sobre su aplicación.....	75
2. Aplicación en el derecho administrativo	79
4. Particularidades en el derecho ambiental	81
CAPÍTULO VI.....	85
CUANTIFICACIÓN DEL DAÑO AMBIENTAL	85
1. Potencial ambiental de un bosque peruano.....	91
1.1. Potencial de carbono	93
1.2. Pérdida de carbono almacenado en bosques.....	94
1.3. Costo del carbono almacenado.....	104
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	107

INTRODUCCIÓN

La actual legislación ambiental peruana viene evolucionando y desarrollando todo un sistema de responsabilidad administrativa por daño ambiental que permite establecer parámetros claros acerca de la imputación de responsabilidad administrativa por daño ambiental a las empresas que son susceptibles de ocasionar dichos daños, como son las mineras, empresas dedicadas a los hidrocarburos, entre otros. Por otro lado, cuenta con una doctrina que desarrolla el tema de legislación desarrollada respecto al análisis de causalidad en la imputación de responsabilidad por daño ambiental siendo este un elemento gravitante a la hora de imputar responsabilidad.

La importancia de analizar el daño ambiental, radica en que este elemento es un requisito fundamental para imputar responsabilidad en la medida en que permite encontrar la relación entre el sujeto que origina el daño y el daño en sí mismo. Del mismo modo, es vital el estudio de este elemento debido a la complejidad de determinar la causalidad en el tema ambiental, pues el daño producido al ambiente no aparece de manera inmediata, sino puede hacerse visible años después.

En nuestro ordenamiento jurídico no existe mayor desarrollo ni legislativo ni jurisprudencial en lo que respecta el nexo de causalidad para la atribución de responsabilidad por daño ambiental. Dentro de la Ley General del Ambiente (Ley N° 28611 - Ley General del Ambiente, 2005) LGA en adelante, se regula la responsabilidad por daño ambiental como un régimen especial de responsabilidad administrativa, circunscribiéndose así a la aplicación de los principios generales regulados en el artículo 230° de Ley del Procedimiento Administrativo General (Ley N° 27444 - Ley del Procedimiento Administrativo General, 2001) (LPAG) en adelante. Dentro de este artículo, en el inciso 8 se regula el principio de causalidad, el cual establece que la responsabilidad administrativa recae sobre el causante del ilícito administrativo, sin embargo, esto no ha tenido un desarrollo específico en nuestro medio.

En lo que respecta a los precedentes del Tribunal Fiscalización Ambiental, el cual resuelve como última instancia administrativa los casos de daño ambiental dentro de este esquema de responsabilidad administrativa, no existe ningún pronunciamiento que tenga la calidad de vinculante. Sin embargo, en el fundamento 89° de la (Resolución N° 292-2013-OEFA/TFA, 2013), ha establecido los elementos que deben verificarse para poder atribuir responsabilidad administrativa por daño ambiental. Este fundamento señala lo siguiente:

“En tal sentido, a efectos de determinar la correcta aplicación del citado principio en el presente procedimiento, este Tribunal Administrativo considera oportuno verificar los siguientes aspectos:

- a) La ocurrencia de los hechos imputados; y
- b) La ejecución de los hechos”

Fuera de esta aplicación que, aunque limitada, brinda un poco más de claridad sobre la aplicación del principio de causalidad en responsabilidad administrativa por daño ambiental, no hay mucho desarrollo al respecto. Incluso este mismo pronunciamiento se limita a explicar dos elementos que resultan obvios de la aplicación del citado inciso 8 del artículo 230° de la LPAG (Ley N° 27444 - Ley del Procedimiento Administrativo General, 2001), pero no aporta nada respecto a las consideraciones especiales que se deben tener respecto al daño ambiental y sus particularidades técnicas.

Por otro lado, el desarrollo doctrinario también se encuentra ausente. Si bien en nuestro medio ha tenido gran desarrollo la teoría de la relación causal como elemento indispensable de los regímenes de responsabilidad civil y penal, dentro del ámbito específico del derecho ambiental no existe un estudio pormenorizado. En esta materia, existen estudios generales sobre todo el régimen de responsabilidad por daño ambiental, centrándose en cómo funciona este dentro de nuestro ordenamiento a partir del concepto de daño ambiental que recoge el artículo 142° de la LGA, pero el tema de la causalidad no ha merecido un tratamiento específico en ningún estudio.

A diferencia de lo que ocurre dentro de nuestro medio, la doctrina extranjera si ha dedicado sendas páginas a su análisis, pasando por la interpretación de las normas comparadas, así como la crítica a pronunciamientos de instancias foráneas en casos específicos. Así, por ejemplo, por solo mencionar como ejemplo a Ruda Gonzales (2008) en su libro “El Daño Ecológico Puro”, desarrolla su teoría respecto a la denominada causalidad concurrente, a partir de pronunciamientos de jueces suizos, señalando lo siguiente:

En un primer grupo de casos, el daño resulta de la acción conjunta o concurrente o convergente de dos o más agentes. Se puede entonces suprimir mentalmente una de las causas, pero no todas ellas sin que el daño desaparezca, ya que las conductas individuales hubiesen producido el daño aun sin las demás.

(...)

Por ello, el criterio aplicado en el caso Compostilla contrasta con el adoptado por el TS federal suizo en un caso sobre daños a cultivos de albaricoques por contaminación del aire. Para el mismo, el hecho de que existan emisiones de terceros distintos al demandado que también hayan podido causar los daños no puede invocarse para atenuar la responsabilidad (Ruda Gonzales, 2008) (pág. 352-353).

Con esta cita se evidencia el nivel de desarrollo doctrinario existente en otras latitudes. Sobre la base de esto, existe material para realizar un análisis de similar envergadura en lo que respecta a nuestra regulación para la mejor aplicación del régimen de responsabilidad de daño ambiental.

Hoy en día, el daño ambiental está ocurriendo a escala global. Muchos biomas están sufriendo daños a gran escala por diversos factores. El calentamiento global se señala como la causa principal entre muchas causas. También se incluyen factores de destrucción ambiental localizados. El daño ambiental masivo puede causar vías de retroalimentación negativa en el ecosistema (Lim et al., 2022) including carbon dioxide CO₂.

Las áreas naturales con el ecosistema integrado pueden funcionar como áreas ecológicamente amigables para la reproducción de flora y fauna en ambientes alterados (R. J. Hobbs et al., 2014). Sin embargo, en la naturaleza la integridad ecológica tiende a resistir el cambio ambiental y tiene un efecto amortiguador sobre el impacto del cambio climático. Ofrecen un hábitat adecuado durante mucho tiempo para las especies autóctonas y muestran una mejor adaptabilidad al entorno más nuevo (R. Hobbs et al., 2011), generando distorsiones y desbalances naturales como en los ciclos biogeoquímicos, que forman parte del desarrollo de este libro, el cual iremos explicando paso a paso.

Los desechos que se generan en todos los procesos antropogénicos comprenden residuos sólidos industriales peligrosos y los no peligrosos, las variadas composiciones y concentraciones de estos desechos industriales peligrosos o no, han creado graves peligros ambientales porque tienen el potencial de contaminar en gran medida el agua, el aire y el suelo (Ghodke et al., 2023).

CAPÍTULO I

AMBIENTE

Tradicionalmente se entiende a “ambiente” como el conjunto de elementos abióticos (energía solar, suelo, agua y aire) y bióticos (organismos vivos) que integran la biosfera. Esta definición no explica cabalmente las complejas interacciones que se generan entre el ser humano en el mundo contemporáneo. La existencia humana depende del medio ambiente. La protección del medio ambiente requiere leyes. Las normas relativas a la protección del medio ambiente nos dan una hoja de ruta para ello (Arc, 2024).

Diferentes estudiosos y pensadores como los filósofos, economistas y educadores, al meditar y hacer suyos los problemas que van surgiendo con la actualidad, de la relación hombre - naturaleza – cada quien de acuerdo a su perspectiva y realidad – ha ampliado y modificado el significado de ambiente. El paso del tiempo ha hecho que haya sustituido el lenguaje especializado al término “medio ambiente” por el de “ambiente”; este es el cambio de una percepción biológica por otra multidisciplinaria, salida de los intereses sociales por el sin número de estadios críticos ambientales pasados a lo largo del tiempo. Esta tendencia ha beneficiado la concepción de “ambiente”, al expandir su acción confinado exclusivamente de lo “natural” progresivamente avanzando hacia un proceso “sociedad-naturaleza”.

El término “ambiente” no tiene el mismo significado para las diferentes ciencias, si no un campo de inicio y límite de la realidad problemática.

Para iniciar con la causalidad del daño ambiental, empezaremos conceptualizando la palabra “ambiente”, para ello debemos diferenciar ciertas cosas, primero, “ambiente” no es sinónimo de ecología; segundo, ecología, es una disciplina científica. Para lograr definir el concepto de daño am-

biental, necesitamos saber explícitamente que significa ambiente, ya que, es el protagonista afectado por las acciones humanas, y que es bastante engorroso probar la afectación causante; procedemos a definir ambiente:

Silvia Jaquenod

Sistema de diferentes elementos fenómenos, procesos naturales y agentes socioeconómicos y culturales, que interactúan condicionando, en un momento y espacio determinados, la vida y el desarrollo de los organismos y el estado de los componentes inertes, en una conjunción integradora, sistémica y dialéctica de relaciones de intercambio (Zsögön, 2024).

El Consejo Internacional de la Lengua Francesa (étrangères, 2023)

“... Conjunto en un momento dado de los agentes físicos, químicos, biológicos y de los factores sociales, susceptibles de tener un efecto directo e indirecto, inmediato o aplazado sobre los seres vivos y las actividades humanas.

Directiva de la Comunidad Económica Europea, número 85/337/CEE (1985) (Parker & Corbitt, 1993)

“... el sistema constituido por diferentes variables de estado y flujo, es decir, por el hombre, la fauna, la flora, el clima, el aire, el suelo, el agua, y el paisaje, la interacción entre los ítems anteriores, los bienes materiales y el patrimonio cultural

La Rae (ASALE & RAE, 2024), lo define así:

Conjunto de factores o de elementos físicos (tierra, agua, aire, clima...), biológicos (fauna, flora, suelo...) y socioculturales (asentamientos y actividad humana, uso y disfrute del territorio, formas de vida, patrimonio artístico y cultural, salud de las personas...), así como la interacción entre los factores o elementos indicados, que integran el entorno donde se desarrolla la vida del ser humano y de la sociedad.

Carlos Andaluz

“El ambiente es el conjunto de elementos sociales, económicos, culturales, bióticos y abióticos que interactúan en un espacio y tiempo determinado; lo cual podrá graficarse como la sumatoria de la naturaleza y las manifestaciones humanas en un lugar y tiempo concreto” (Andaluz Westreicher, 2006)

De la Puente (Brunke, 2011):

El ambiente puede ser definido –si es que cabe definir aquello que no se conoce completamente– como la integración de todos los elementos que componen el sistema en el que vivimos –la biosfera– y la interacción entre ellos mismos. Esto incluye, pues, lo vivo y lo inanimado, lo visible y lo invisible, lo natural y lo construido; así como la relación entre los mismos, sea ésta tangible o intangible.

El medio ambiente es “una palabra que describe, en conjunto, todas las fuerzas, influencias y condiciones extrínsecas (externas) que afectan la vida, la naturaleza, el comportamiento y el crecimiento, desarrollo y maduración de la vida”.

Para Buongiorno & Chiaramonte (2023)

El conjunto de condiciones en las que se desarrolla la vida: es el sistema complejo de factores físicos, químicos y biológicos, de elementos vivos y no vivos y de las relaciones en las que se establecen todos los organismos que habitan el medio ambiente. planeta están inmersos.

Para (University of Oxford, 2024)

El entorno total en el que se encuentra una sociedad humana; todos los factores que de alguna manera afectan su modo de vida.

Para la Real Academia Española (ASALE & RAE, 2024)

“situaciones o condiciones físicas, sociales, económicas, etc. de un espacio, una comunidad o época”. (<https://dle.rae.es/ambiente?m=form>).

Diccionario panhispánico del español jurídico

Conjunto de factores o de elementos físicos (tierra, agua, aire, clima...), biológicos (fauna, flora, suelo...) y socioculturales (asentamientos y actividad humana, uso y disfrute del territorio, formas de vida, patrimonio artístico y cultural, salud de las personas...), así como la interacción entre los factores o elementos indicados, que integran el entorno donde se desarrolla la vida del ser humano y de la sociedad (RAE, 2023)

Enciclopedia McGraw-Hill de ciencias e ingeniería ambientales

“El conjunto de todas las condiciones e influencias externas que afectan la vida y el desarrollo de un organismo vivo” (Parker & Corbitt, 1993)

Para la FAO (1996)

El ambiente es el producto de la interacción dinámica de todos los elementos, objetos y seres vivos presentes en un lugar. Todos los organismos viven en medio de otros organismos vivos, objetos inanimados y elementos, sometidos a diversas influencias y acontecimientos. Este conjunto constituye su medio ambiente.

Plantas y animales dependen de los componentes y características del medio para crecer y reproducirse. A lo largo de su evolución, muchas especies han desarrollado una tolerancia para resistir ciertas limitaciones. Esta tolerancia o adaptación es un proceso que les permite vivir sometidas a condiciones ambientales que pueden no ser adecuadas para otras especies (FAO -Organización de las naciones unidas para la agricultura y alimentación, 1996)

En conclusión, de manera simultánea lo que se pueda percibir y sentir, en un determinado instante y espacio de la vida, siempre estaba, está y estará intrínsecamente ligado al ambiente, además, las referentes “características y funcionalidades se diferencian con lo que se puede dividir un espacio o un local”.

El concepto de medio ambiente es dúctil, como consecuencia, no existe una definición única, actualmente, la tendencia es ampliar la definición de ambiente incluyendo varios niveles, dimensiones y elementos de las interacciones naturaleza - factor humano. El ambiente al ser un bien jurídico global, está constituido por un sistema que involucra elementos naturales y sociales que se rigen por diferentes manifestaciones de la vida, por ejemplo, los seres humanos, somos uno de los muchos componentes del ambiente que reunimos para nuestra supervivencia elementos bióticos y abióticos.

El registro etimológico de Corominas (1973) propone que la iniciación del vocablo es la voz latina *ambiens*, que describe lo que rodea a algo, cuya bifurcación expresada es *ambiere*: cercar, envolver o rodear.

En el artículo 123° de la *CONSTITUCION POLITICA DEL PERU (1979)*, encontramos un acápite en cuanto al reconocimiento del ambiente, que, si bien no fue con un carácter fundamental de este derecho, pero iniciaba el cambio jurisdiccional, que a la letra menciona:

“Todos tienen el derecho de habitar en ambiente saludable, ecológicamente equilibrado y adecuado para el desarrollo de la vida y la preservación del paisaje y la naturaleza.

Todos tienen el deber de conservar dicho ambiente. Es obligación del Estado prevenir y controlar la contaminación ambiental.”

Luego, la nueva *Constitución Política del Perú* de 1993 fue sometida a Referéndum el 31 de octubre, el pueblo en forma mayoritaria la aprobó; allí se establecen en el artículo 2º, numeral 22, los Derechos fundamentales de la persona; toda persona tiene derecho a:

“A la paz, a la tranquilidad, al disfrute del tiempo libre y al descanso, así como a **gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida**”.

Hasta este punto empieza a materializarse derecho, asociada a dos objetivos intermedios:

- gozar de un ambiente equilibrado; y,
- gozar de un ambiente adecuado;

Además, de un objetivo final:

- el desarrollo de su vida.

La concepción de “**ambiente**” para la constitución abarca de manera clara la intención de protección ambiental del Estado hacia la **colectividad**, sin perjuicio de lo señalado, la relación del acervo legal existente para la protección del bien jurídico “ambiente” desde el momento de existir y entrar en rigor lo convierte en un derecho constitucional, mientras no se demuestre lo contrario, por consiguiente, en la misma carta magna, en el artículo 2º, numeral 22 expresa de manera tácita la constitucionalidad a gozar de un ambiente equilibrado como derecho inherente a la persona.

Con fecha 7 de setiembre del año 1990, se promulga en el Perú el *Decreto Legislativo N° 613*: “El Código del Medio Ambiente y los Recursos Naturales” (Derogado por la Ley N° 28611 - Ley General del Ambiente. 2005-10-13); que tenía como finalidad proteger el ambiente y reglamentar el uso sostenido de los recursos naturales, donde establecía las orientaciones para concebir, formular y aplicar la política ambiental que son, entre otras:

1. Conservar el medio ambiente y los recursos naturales para satisfacer las necesidades de las generaciones presentes y futuras;
2. Orientar la educación ambiental a fin de alcanzar el desarrollo sostenido del país; 3) aprovechar los recursos naturales de modo compatible con el equilibrio ecológico y el interés social;
3. controlar y prevenir la contaminación y mantener los procesos ecológicos esenciales;
4. Dar mayor preferencia a la prevención de los daños ecológicos que a su reparación; 6) controlar la contaminación principalmente en las mismas fuentes emisoras.

La política ambiental se expresará a través de la planificación ambiental tiene por objeto crear las condiciones para el restablecimiento y el mantenimiento del equilibrio entre la conservación del ambiente y el desarrollo nacional, con el fin de alcanzar una calidad de vida compatible con la dignidad humana. Además, con miras a proteger el medio ambiente en general el Código dispone que todo proyecto de obra o de actividad que pueda provocar daños no tolerables al ambiente sea sometido a un estudio de impacto ecológico.

Posteriormente, mediante la Ley N° 26410 (*Ley del Consejo Nacional del Ambiente* | SINIA, 1994), se creó el Consejo Nacional del Ambiente -CONAM, como organismo descentralizado, con personería jurídica de derecho público interno, con autonomía funcional, económica, financiera, administrativa y técnica, dependiente de la Presidencia del Consejo de Ministros.

El CONAM, como organismo descentralizado, dependiente de la Presidencia del Consejo de ministros, en tanto, era el organismo rector de la política nacional ambiental, teniendo como finalidad planificar, promover, coordinar, controlar y velar por el ambiente y el patrimonio natural de la Nación. La política nacional en materia ambiental que formula el CONAM es de cumplimiento obligatorio.

En su artículo 4° (inc. j) de La Ley 26410 y el Decreto Ley N° 17537 establecen que la defensa de los intereses y derechos del Estado, está a cargo de los procuradores públicos, establece que al CONAM le compete

demandar el inicio de las acciones administrativas, civiles y/o penales correspondientes en los casos de incumplimiento de las políticas, normas y/o directivas que emanen del CONAM, esto amparado en el en su artículo 47° de la Constitución Política del Estado.

Pero la mencionada norma no establece al responsable de ejercer la defensa del interés del Estado, respecto al incumplimiento del Código del Medio Ambiente y del Código Penal, pero eso es un temo que abordaremos en el próximo capítulo.

Ya para el año 2005, la *Ley N° 28611 - Ley General del Ambiente*, adopta un proyecto más amplio de la significación “ambiente”, al señalar en su artículo 2°, numeral 2.3, así:

Entiéndase, para los efectos de la presente Ley, que toda mención hecha al “ambiente” o a “sus componentes” comprende a los elementos físicos, químicos y biológicos de origen natural o antropogénico que, en forma individual o asociada, conforman el medio en el que se desarrolla la vida, siendo los factores que aseguran la salud individual y colectiva de las personas y la conservación de los recursos naturales, la diversidad biológica y el patrimonio cultural asociado a ellos, entre otros.

Este juicio detallado del ambiente, asimismo ha estado ratificado por el Tribunal Constitucional, en repetidos fallos:

“El ambiente se entiende como un sistema; es decir, como un conjunto de elementos que interactúan entre sí. Por ende, implica el compendio de elementos naturales – vivientes o inanimados- sociales y culturales existentes en un lugar y tiempo determinados, que influyen en la vida material y psicológica de los seres humanos. Por dicha razón, es objeto de protección jurídica y forma parte del bagaje de la tutela de los derechos humanos. El ambiente es concebido como el medio en el cual se encuentran contenidos todos los factores que hacen posible la existencia humana y la de los demás seres vivos. Por consiguiente, alude a todas las condiciones e influencias del mundo exterior que rodean a los seres vivientes y que permiten –de una manera directa o indirecta- su sana existencia y coexistencia”. (Fundamento 6 / *Exp. N° 0018-2001-AI*)

Desde la perspectiva constitucional (TC), y a efectos de su protección, se hace referencia, de modo general, al medio ambiente como el lugar donde el hombre y los seres vivos se desenvuelven. En dicha definición se incluye “(...) tanto el entorno globalmente considerado –**espacios naturales y recursos que forman parte de la naturaleza: aire, agua, suelo, flora, fauna- como el entorno urbano**”; además, el medio ambiente, así entendido, implica las interrelaciones que entre ellos se producen: clima, paisaje, ecosistema, entre otros”. (Fundamento 17 / *Exp. N° 0048-2004-PI*).

La protección jurídica sobre el mismo, recaería sobre:

- Elementos físicos, químicos y biológicos
- De origen natural o antropogénico, de manera individual o asociada
- Que conforman el medio en el que se desarrolla la vida
- Factores que aseguran la salud individual y colectiva de las personas y la conservación de los recursos naturales, la diversidad biológica y el patrimonio cultural asociado a ellos, entre otros
- Elementos naturales vivientes o inanimados
- Elementos sociales y culturales
- En un lugar y tiempo determinados
- Influyen en la vida material y psicológica de los seres humanos
- Son derechos humanos
- Todos los factores que hacen posible la existencia humana y la de los demás seres vivos
- Todas las condiciones e influencias del mundo exterior que rodean a los seres vivos y que permiten –de una manera directa o indirecta– su sana existencia y coexistencia
- El lugar donde el hombre y los seres vivos se desenvuelven
- El entorno globalmente considerado
- Espacios naturales y recursos que forman parte de la naturaleza: aire, agua, suelo, flora, fauna (Alegre Ch., A., 2010).

Entonces, el alcance jurídico de “ambiente” viene a ser, el “conjunto de elementos, factores y recursos, naturales y generados por el hombre que, de manera independiente o conjunta, interrelacionada o bajo cualquier condición, conforman el entorno en el que se desarrolla su vida en el más amplio sentido del término y que son susceptibles de afectarla” (Alegre Ch., A., 2010).

Por otro lado, se promulgan leyes para salvaguardar el medio ambiente y garantizar el sustento de las generaciones actuales y futuras para evitar tales tragedias o percances; el ambiente se define como el aire, el agua y la tierra, así como cualquier vínculo existente. entre humanos, otros seres vivos, plantas y propiedades, así como entre el agua, el aire y la tierra (Arc, 2024). Proteger el ambiente no sólo es esencial para preservar el mundo natural sino también para proteger la salud humana, para ello es necesario crear, modificar y actualizar para protegernos a nosotros mismo de, nosotros mismos, no obstante, las leyes ambientales están diseñadas para abordar diversas preocupaciones ambientales que pueden afectar directa o indirectamente la salud humana, como la contaminación del aire, la contaminación del agua y los desechos peligrosos.

Las preguntas frecuentes de cómo se puede valorar y conservar los ecosistemas y sus servicios para abordar los desafíos sociales relacionados con la protección ambiental y humana, es en parte responsabilidad del Estado, el uso de instrumentos económicos para la protección ambiental, las sanciones ambientales efectivas, el acceso a la información, etc. (Aragão et al., 2016).

CAPÍTULO II

ECOSISTEMA

Ecosistema es la idea de que la flora y la fauna interactúan con el medio ambiente para formar un complejo ecológico, esto ha sido durante mucho tiempo, la percepción pública de la ecología y para aumentar la conciencia sobre la degradación ambiental, claramente un ecólogo podría explicar el concepto de ecosistema, desde su evolución, describiría cómo numerosos investigadores estadounidenses y europeos contribuyeron a su evolución y analiza el crecimiento explosivo de los estudios de ecosistemas.

Analizando el desarrollo del concepto de ecosistema, a finales del siglo XIX y principios del XX y analiza la acuñación del término ecosistema por el ecologista inglés Sir Arthur George Tansley en 1935 (Books, 2003). Luego el analista y ecologista estadounidense Raymond Lindeman aplicó el concepto a un pequeño lago en Minnesota y mostró cómo la biota y el medio ambiente del lago interactuaban a través del intercambio de energía (García Curilaf & Dene-gri, 2016). Golley describe lo fundamental sobre ecología escrito por Eugene P. Odum, quien ayudó a popularizar el concepto de ecosistema y cómo muchos otros científicos investigaron sus principios y publicaron sus resultados. Relata cómo los estudios de ecosistemas dominaron la ecología en la década de 1960 y se convirtieron en un elemento clave de los estudios de biomas del “Programa Biológico Internacional en los Estados Unidos”, un programa destinado “*al mejoramiento de la humanidad*”, específicamente a través de la conservación, la genética humana y las mejoras con el uso de recursos naturales; como el estudio de los ecosistemas de cuencas hidrográficas en Hubbard Brook, New Hampshire, abrió nuevos caminos en la investigación de los ecosistemas al definir los límites del sistema de forma natural; y cómo la investigación actual utiliza el concepto de ecosistema, se muestra cómo el concepto de ecosistema ha sido moldeado a nivel internacional tanto por desarrollos en otras disciplinas como por personalidades y políticas (Golley B., 1996).

Concepto

Tsujimoto et al. (2018)

“Un sistema biológico compuesto por todos los organismos que se encuentran en un entorno físico particular, interactuando con él y entre sí. También en uso extendido: un sistema complejo parecido a este”

Knapp (2019)

Un ecosistema o bioma describe un entorno único y cada organismo vivo (biótico) y factor no vivo (abiótico) que está contenido en él o lo caracteriza. Un ecosistema encarna todos los aspectos de un hábitat único, incluidas todas las interacciones entre sus diferentes elementos.

Universidad de Michigan:

Un ecosistema consiste en la comunidad biológica que ocurre en algún lugar y los factores físicos y químicos que conforman su ambiente no vivo o abiótico. Hay muchos ejemplos de ecosistemas: un estanque, un bosque, un estuario, una pradera. Los límites no están fijados de forma objetiva, aunque a veces parezcan obvios, como ocurre con la orilla de un pequeño estanque. Generalmente los límites de un ecosistema se eligen por razones prácticas que tienen que ver con los objetivos del estudio particular (University of Michigan, 2017).

Gomez-Marquez (2022) prokaryotic (bacteria and archaea:

El ecosistema es un concepto biológico esencial que vincula lo vivo y lo inanimado y representa la principal unidad estructural y funcional de la naturaleza, además, propongo siete características distintivas que son inherentes a cualquier ecosistema: biodiversidad, entorno físico, jerarquía, interactividad, apertura, “homeostasis” y evolutivo. A partir de la interacción y el acoplamiento de estos mundos vivos con el medio ambiente (el mundo ambiental), defino el ecosistema como un conjunto específico y dinámico de mundos vivos y no vivos que funciona como un sistema abierto, jerárquico y en evolución.

Esta compleja red de interacciones que llamamos ecosistema se puede representar gráficamente como un triángulo que refleja el equilibrio dinámico entre todos los mundos.

Finalmente, propongo una nueva forma de relacionar gráficamente el ecosistema con la biodiversidad tomando el ecosistema como el núcleo del que emergen todos los mundos vivos.

Britannica

Es el complejo de organismos vivos, su entorno físico y todas sus interrelaciones en una unidad particular de espacio; se puede clasificar en sus constituyentes abióticos, incluidos los minerales, el clima, el suelo, el agua, la luz solar y todos los demás elementos no vivos, y sus constituyentes bióticos, que consisten en todos sus miembros vivos, uniendo estos componentes hay dos fuerzas principales: el flujo de energía a través del ecosistema y el ciclo de nutrientes dentro del ecosistema; los ecosistemas varían en tamaño: algunos son lo suficientemente pequeños como para estar contenidos en gotas de agua individuales, mientras que otros son lo suficientemente grandes como para abarcar paisajes y regiones enteras (Británica, 2024).

Universidad de Cambridge

Todos los seres vivos en un área y la forma en que se afectan entre sí y al medio ambiente; cualquier sistema complicado que consta de muchas personas, procesos, actividades, etc. diferentes, especialmente en relación con la tecnología, y la forma en que se afectan entre sí (University of Cambridge, 2024).

Toda la superficie de la Tierra es una serie de ecosistemas conectados, que suelen estar conectados en un bioma (como sustantivo: Zona del planeta que se puede clasificar según la vida vegetal y animal que contiene) más grande. Los biomas son grandes extensiones de tierra, mar o atmósfera. Los bosques (como sustantivo: Ecosistema lleno de árboles y maleza), los estanques, los arrecifes y la tundra son todos tipos de biomas, por ejemplo. Están organizados de manera muy general, según los tipos de plantas y animales que viven en ellos. Para comprender el funcionamiento de la naturaleza y la multitud de cuestiones ambientales que se dan en la actualidad, el concepto de ecosistema es especialmente fascinante.

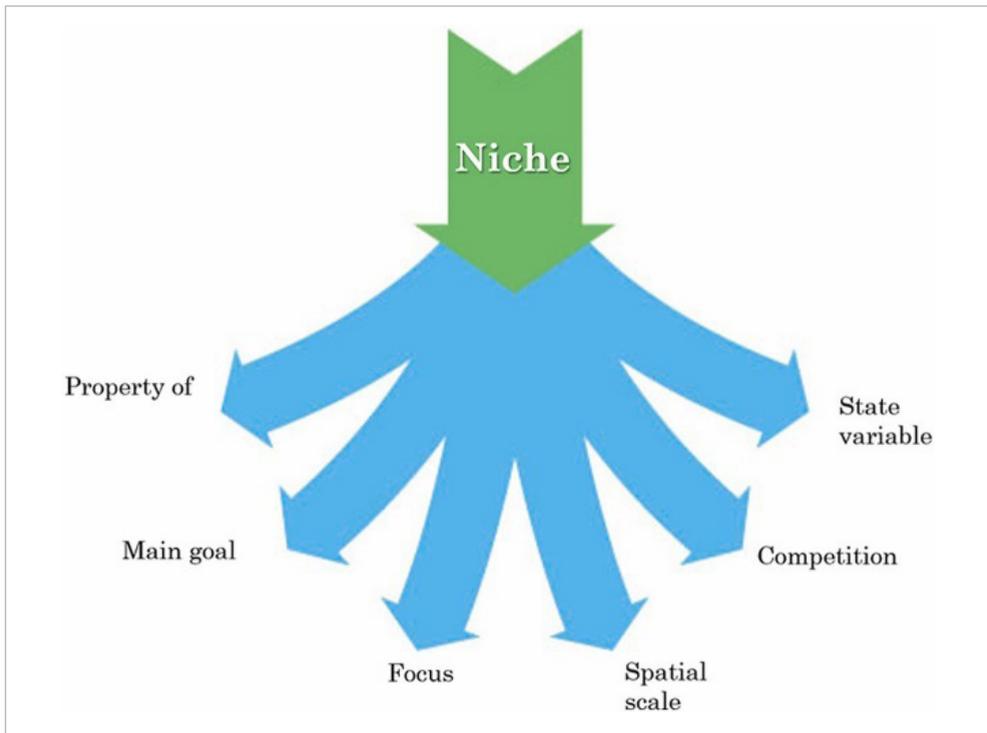
El ecosistema como concepto tiene su origen en la ciencia de la ecología y conceptualiza el **flujo de materia y energía**, puede definirse como “el reciclaje de flujos de nutrientes a lo largo de vías formadas por subsistemas vivos que están organizados en funciones orientadas a procesos; conecta subsistemas vivos y no vivos; los gradientes de energía impulsan el reciclaje de nutrientes escasos, por ejemplo, una selva tropical” (Granstrand & Holgersson, 2020).

Esto se refleja en una perspectiva antropocéntrica más que ecológica, refiere básicamente el aspecto de los servicios que brindan a la humanidad, además a las funciones de los éstos como procesos bióticos y abióticos dentro de un ecosistema. (Krohs & Zimmer, 2023). Con la actual resiliencia de los actores del conjunto de ecosistemas, se han optado nuevas denominaciones, ya que estos espacios ecosistémicos se han visto amenazados por la actividad antrópica y la poca creatividad se ser revertidos de manera positiva, uno de los conceptos es el **Ecosistema de Innovación**, es el conjunto en evolución de actores, actividades y artefactos, y las instituciones y relaciones, incluidas las relaciones complementarias y sustitutivas, que son importantes para el desempeño innovador de un actor o una población de actores. (Granstrand & Holgersson, 2020).

Nicho Ecológico

Figura 1

Características del nicho ecológico



Fuente: Sales et al. (2021)

Define las relaciones especie-hábitat y proporciona un marco útil para comprender la variedad y abundancia de especies en relación con factores bióticos y abióticos (Lewis *et al.*, 2017). La influencia de las variables abióticas se incrementa a medida que aumenta el alimento, esto limita la explicación de los factores bióticos en un determinado lugar (King *et al.*, 2021). Además, el requisito inicial para el crecimiento y desarrollo de cualquier sistema es la entrada de energía o materia de baja entropía a través de los límites del sistema (Fath *et al.*, 2004) this organization can be observed in the thermodynamic parameters that describe it, such that these parameters can be used to track ecosystem growth and development during succession. Thermodynamically, ecosystem growth is the increase of energy throughflow and stored biomass, and ecosystem development is the internal reorganization of these energy mass stores, which affect transfers, transformations, and time lags within the system. Several proposed hypotheses describe thermodynamically the orientation or natural tendency that ecosystems follow during succession, and here, we consider five: minimize specific entropy production, maximize dissipation, maximize exergy storage (includes biomass and information. El análisis forestal aleatorio muestra que los factores bióticos y abióticos tiene un impacto importante en la multifuncionalidad del ecosistema y los ciclos de C, N y P a nivel comunitario (Wang *et al.*, 2021). Cada factor o componente en un ecosistema depende de todos los demás factores, ya sea directa o indirectamente; la permuta en la temperatura de un ecosistema siempre afectará a las plantas que crecen ahí, por ejemplo, los animales que dependen de las plantas para nutrirse y albergar tendrán que adecuarse a los cambios, cambiar a otro ecosistema o extinguirse.

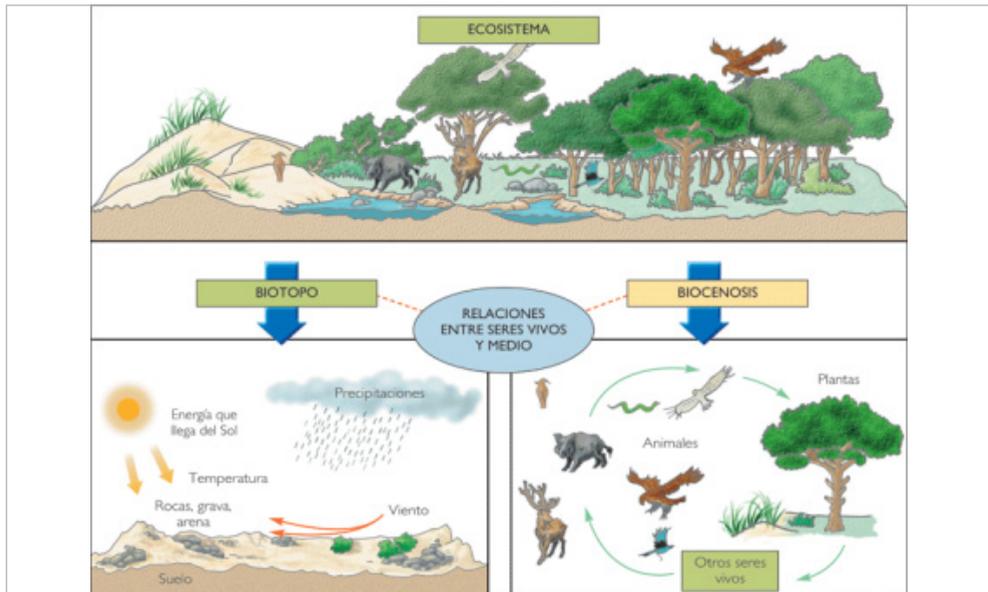
Un concepto profundo y completo está enmarcado por Británica (2024):

“Un hábitat, es la unidad biológica funcional de la vida, y se entiende como un sistema ecológico complejo que abarca la biocenosis, es decir el conjunto de organismos vivos o elementos bióticos de un área determinada (plantas, animales, hongos, bacterias, insectos, etc.) que interactúan entre sí mediante procesos como la depredación, el parasitismo, la competencia y la simbiosis; al mismo tiempo, se encuentran estrechamente enlazados con el **biotopo**, en otras palabras, el medio ambiente físico o elemento abiótico (las rocas, la tierra, los ríos, el clima) esto al

desintegrarse y volver a ser parte del ciclo de energía y de nutrientes, consistiendo entonces en entidades materiales bióticas y abióticas integradas de forma armónica en un espacio determinado” (Fig. 2).

Figura 2

Componentes del ecosistema: Biocenosis y Biotopo.



Fuente: (Británica, 2024).

Componentes abióticos y bióticos

Factor abiótico

Parte no viva de un ecosistema que da forma a su entorno. En un ecosistema terrestre, los ejemplos podrían incluir la temperatura, la luz y el agua.

La respuesta de un organismo al cambio climático puede estar impulsada por procesos genéticos (evolutivos) o no genéticos (plásticos) (p. ej., (Franks *et al.*, 2014); Kingsolver & Buckley, 2017) Esta distinción es importante porque el mecanismo determina la tasa de respuesta y si los individuos, las poblaciones y las especies podrán seguir el ritmo de las condiciones que cambian rápidamente (Boutin & Lane, 2014). Las respuestas plásticas ocurren durante la vida de un individuo y son casi inmediatas, mientras que el cambio evolutivo requiere múltiples generaciones (Harris-

son *et al.*, 2014; Hendry *et al.*, 2011). Las investigaciones actuales están comenzando a explorar el papel de las respuestas epigenéticas, en las que los impulsores ambientales alteran la expresión genética y pueden transmitirse a generaciones futuras, ocurren entre generaciones y se consideran respuestas intermedias (Jeremias *et al.*, 2018). La distinción entre respuestas plásticas/epigenéticas y cambio evolutivo no siempre es clara, ya que la capacidad de un organismo para responder a través de estos mecanismos puede ser hereditaria y estar sujeta a presión evolutiva (Banta & Richards, 2018; Weiskopf *et al.*, 2020).

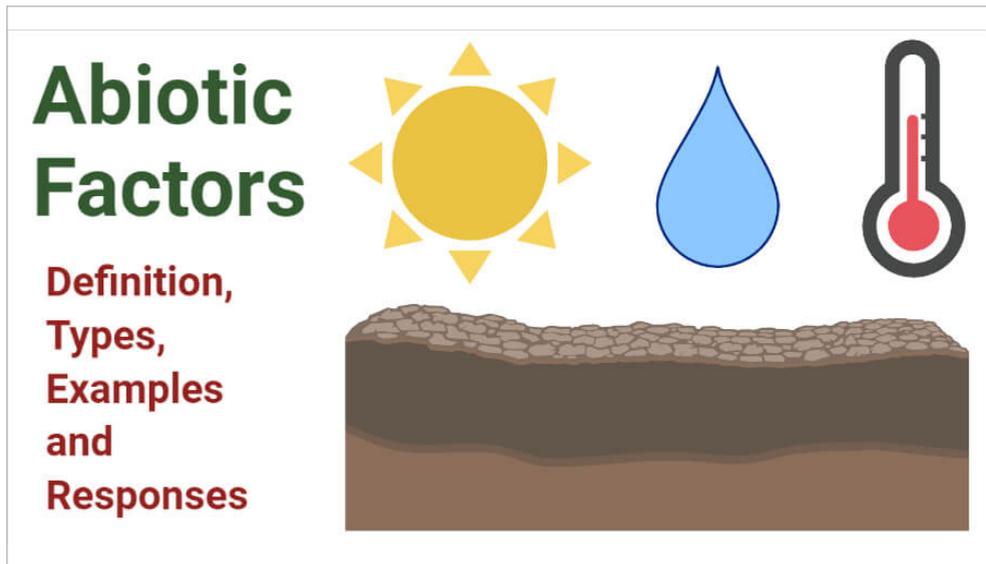
No obstante, la importancia de los componentes abióticos de los ecosistemas es frecuentemente reconocida, la gran mayoría de los estudios ecológicos (incluidos los que tocan los efectos indirectos) tienden a estudiar en detalle sólo las relaciones entre las biotas. La limitación de la síntesis integradora a la interacción de las especies sólo corta un abundante estudio ambiental útil relacionado, por ejemplo, con cuestiones del cambio climático global y otras causas que usualmente sentimos solo los efectos. Debe advertirse, sin embargo, que la ciencia de la dinámica de los ecosistemas es extensamente interdisciplinaria y la información distinguida, por lo tanto, encontrarse no sólo en la ecología y la biología, sino también implícitamente con cualquier ciencia natural y ambientales, siendo la geografía, la paleontología, la geo-ecología y la climatología los candidatos los más obvios.

Los cambios en las características físicas de un hábitat causados por la actividad de los llamados “ingenieros del ecosistema” pueden considerarse como un caso extremo de tales interacciones no tróficas. Sin embargo, a menudo, incluso si los componentes abióticos se consideran en términos de residuos, generalmente sólidos, permanentes, que provienen de la descomposición de fuentes orgánicas y/o ciclo de nutrientes, los efectos estudiados en detalle se limitan principalmente a las interacciones tróficas solamente, estas interacciones a veces se denominan “efectos históricos”, “efectos prioritarios” o “regulaciones indirectas retrasadas”. La consideración de estos efectos es particularmente importante para la correcta comprensión del funcionamiento general de un ecosistema; por lo tanto, la importancia de los componentes abióticos del ecosistema y el entorno físico para la dinámica del ecosistema y el desarrollo evolutivo se vuelve cada vez más obvia (Krivtsov, 2008).

Los componentes abióticos son los no vivos y tienen un impacto significativo en el componente vivo. Las plantas utilizan la luz para preparar su alimento. Los animales y los humanos dependen de las plantas para su alimentación. Por lo tanto, el estilo de vida de todos los organismos es posible gracias a la luz solar. Por lo tanto, la luz es un componente abiótico crucial. La temperatura de un lugar determina el tipo de animales o plantas que viven allí. Algunas partes de la Tierra son muy frías (por ejemplo, las áreas polares) y algunas partes son muy cálidas (por ejemplo, el desierto). Entre esas condiciones excesivas, solo sobreviven unas pocas plantas y animales. Todos necesitamos agua para vivir. Aproximadamente tres cuartas partes de la superficie de la Tierra están cubiertas de agua. Aproximadamente el 70% de nuestro peso corporal se debe al agua. Las plantas pueden secarse si no reciben agua. La cantidad de agua en la naturaleza se mantiene a través del ciclo del agua (Azal, 2022).

Figura 3

Componentes del factor abiótico



Factor biótico

Los factores bióticos son las interacciones entre organismos. Ambos afectan la diversidad y la distribución. El muestreo nos ayuda a estimar la cantidad de organismos en un área, Biótico significa "relativo a la vida".

Un factor es algo que influye en otra cosa. Por lo tanto, un factor biótico, en pocas palabras, es un ser vivo que afecta a otras cosas. Un factor biótico también se denomina componente biótico.

Los factores bióticos se caracterizan por ser aquellos organismos vivos, especialmente virus, bacterias, hongos, nematodos, insectos, arácnidos y malezas, artrópodos, mamíferos, etc. (Vera-Reyes *et al.*, 2023).

Un factor biótico podría definirse como “la influencia sobre el medio ambiente de los organismos debido a la presencia y actividades de otros organismos, a diferencia de un factor ambiental físico y abiótico”. En ambas definiciones, una palabra clave es “factor”, que implica “no controlado o no diseñado”. Esto es importante porque cuando un “factor” está controlado, entonces el término correcto es “estrategia” (Carlos Espín de Gea, 2008). Entonces tenemos que los factores bióticos son organismos que interactúan, al evaluar un ecosistema, analizamos una combinación de factores abióticos y bióticos para comprender mejor los patrones y procesos en los sistemas ecológicos. Los factores bióticos incluyen numerosos tipos de interacciones, incluida la competencia (figura 4).

Figura 4

Tipo de interacciones asimétricas entre dos especies

Interacción	Efecto de Sp. 1 sobre Sp. 2	Efecto de Sp. 2 sobre Sp. 1
Explotación	Positivo	Negativo
Competencia	Negativo	Negativo
Mutualismo	Positivo	Positivo
Comensalismo	Ninguno	Positivo
Amensalismo	Ninguno	Negativo
Neutralismo	Ninguno	Ninguno

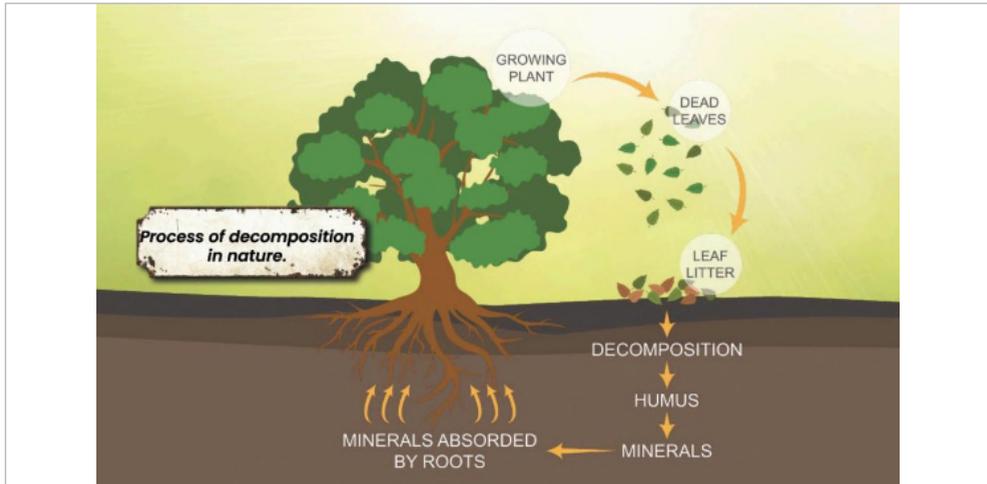
Fuente: Azal (2022)

El componente biótico se convierte en alimento para los descomponedores. Los hongos, junto con las bacterias, descompondrán la materia orgánica muerta. Los nutrientes regresan al suelo a medida que se descom-

ponen. Los descomponedores desempeñan un papel fundamental en el flujo de energía a través de un ecosistema. Descomponen los organismos muertos en materiales inorgánicos más simples, lo que pone los nutrientes a disposición de los productores primarios (*Decomposers*, 2024)

Figura 5

Proceso componente biótico



Fuente: Professor (2024)

Es importante comprender cómo los organismos adquieren energía y cómo esa energía se transmite de un organismo a otro a través de interacciones tróficas. Las interacciones tróficas en una comunidad se pueden representar mediante diagramas llamados cadenas alimentarias y redes alimentarias. Las redes alimentarias ilustran cómo fluye la energía direccionalmente a través de los ecosistemas, incluida la eficiencia con la que los organismos la adquieren, la utilizan y cuánta queda para que la utilicen otros organismos de la red alimentaria.

Los productores que vienen a ser las plantas, capturan energía del sol. El nivel por encima de los productores muestra a los consumidores primarios que se comen a los productores. Por citar algún ejemplo, las ardillas, los ratones, los pájaros que se alimentan de semillas y los escarabajos. Las arañas y los ciempiés comen escarabajos. Los petirrojos comen escarabajos, arañas y ciempiés, y los sapos comen escarabajos y ciempiés. Los zorros

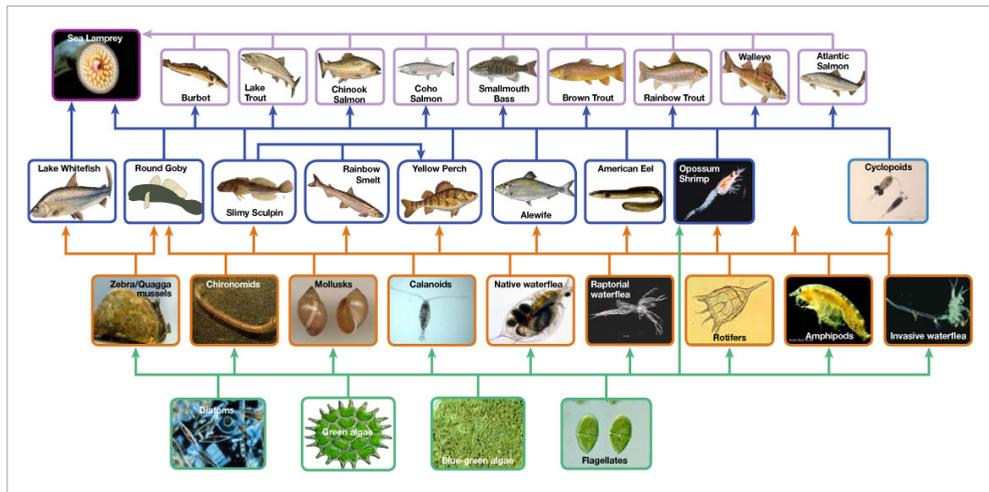
comen ardillas y ratones; los búhos comen ardillas, ratones, pájaros que se alimentan de semillas y petirrojos; y las serpientes comen ratones, pájaros que se alimentan de semillas, petirrojos, ciempiés y sapos. Algunos consumidores se encuentran entre los niveles tróficos porque comen una combinación de consumidores primarios, secundarios y/o terciarios.

Todos los productores y consumidores eventualmente se convierten en alimento para los descomponedores (hongos, moho y bacterias) y detritívoros (lombrices de tierra) del suelo.

Los productores primarios están delineados en verde, los consumidores primarios en naranja, los consumidores secundarios en azul y los consumidores terciarios (de ápice) en violeta. Las flechas apuntan desde un organismo que se consume hasta el organismo que lo consume. Observe cómo algunas líneas apuntan a más de un nivel trófico. Por ejemplo, el camarón zarigüeya se alimenta tanto de productores primarios como de consumidores primarios (figura 6).

Figura 6

Red alimentaria de los niveles tróficos



Fuente: (Ha & Schlegler, 2021)

El equilibrio ecológico garantiza la estabilidad de los organismos y del ambiente, crea un entorno propicio para la multiplicación y el desarrollo de los organismos. Más importante aún, los descomponedores ponen a

disposición de los productores primarios de un ecosistema, generalmente plantas y algas, nutrientes vitales. Los descomponedores digieren los tejidos muertos con la ayuda de enzimas y devuelven los nutrientes al suelo. Por lo tanto, ayudan a mantener limpio el ambiente. Los descomponedores también, pueden reciclar plantas y animales muertos en nutrientes químicos como carbono y nitrógeno que se liberan nuevamente en el suelo, el aire y el agua como alimento para plantas y animales vivos. Es así que, pueden reciclar plantas y animales muertos y ayudar a mantener el flujo de nutrientes disponibles en el ambiente. Las bacterias, invertebrados como gusanos e insectos y los hongos (descomponedores) por ejemplo, descomponen los desechos de plantas y animales muertos en el proceso de descomposición, son el vínculo que mantiene el círculo de la vida en movimiento dentro de un ecosistema.

El carbono como dióxido de carbono, un factor abiótico, ingresa al reino biótico de un ecosistema a través de la fotosíntesis realizada por plantas o microorganismos fotosintéticos. El carbono se mueve a través de los ecosistemas en dos ciclos que se superponen. En el ciclo biótico, se mueven los seres vivos y el aire. En el ciclo abiótico, se moviliza aire, suelo y los océanos. Al quemar combustibles fósiles, los humanos aumentan la cantidad de dióxido de carbono en el aire. El carbono ingresa al mundo biótico a través de la acción principal de los fotoautótrofos, como las plantas y las algas, que utilizan la energía de la luz para convertir el dióxido de carbono en materia orgánica y, en pequeña medida, los quimioautótrofos: como las bacterias, que hacen lo mismo, pero utilizan la energía derivada de una oxidación de moléculas en el ecosistema.

Por otro lado, el daño que se incide por la acción del hombre se ve reflejada en la disminución global de la diversidad y la composición alterada de las comunidades pueden tener efectos adversos sobre las funciones de los ecosistemas, mientras que los cambios ambientales también afectarán fuertemente las funciones del ecosistema. Por lo tanto, comprender las relaciones entre la pérdida de especies y los cambios ambientales, además de cómo estos procesos afectan el funcionamiento del ecosistema, es importante para predecir las funciones futuras del ecosistema.

CAPÍTULO III

CICLOS BIOGEOQUÍMICOS

Prácticamente todas las tareas que realizan los organismos vivos requieren energía. En general, la energía se define como la capacidad de realizar un trabajo o de crear algún tipo de cambio. La energía existe en diferentes formas. Algunos ejemplos son la energía luminosa, la energía cinética, la energía térmica, la energía potencial y la energía química. La energía es necesaria para la mayoría de las vías metabólicas complejas (a menudo en forma de trifosfato de adenosina, ATP), especialmente las responsables de construir moléculas grandes a partir de compuestos más pequeños, y la vida en sí es un proceso impulsado por la energía. Los organismos vivos no podrían ensamblar macromoléculas (proteínas, lípidos, ácidos nucleicos y carbohidratos complejos) a partir de sus subunidades monoméricas sin un aporte constante de energía (Ha & Schleiger, 2021).

Los ciclos biogeoquímicos están muy relacionados con la vida y el medio ambiente de la Tierra a través del flujo de energía y materia (Vallero, 2023), además que constituyen las retroalimentaciones en el Sistema Tierra (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014).

El ciclo biogeoquímico (también llamado ciclo de nutrientes y ciclo elemental) se refiere al concepto generalmente aceptado en ecología de que los organismos del medio ambiente transforman, transportan y reutilizan elementos esenciales (Woodmansee, 1990).

El término ciclo biogeoquímico procede del movimiento cíclico de los elementos que constituyen los organismos biológicos (bio) y el ambiente geológico (geo) e intervienen en un cambio químico.

Los griegos empezaron a describir estos procesos, utilizaron por primera vez la palabra elemento, definiendo que era la estructura de la materia que componía el universo. Los elementos ancestrales de la antigua Grecia fueron agua, aire, fuego y tierra; el elemento básico agua, se incluyó gracias a los estudios de Tales en Mileto (636aC. -547aC) quien se dedicó a estudiar el porqué de las cosas. Los elementos químicos o moléculas naturales son necesario para la existencia de los organismos, a estos también se les denomina nutrientes, las cuales aquellos elementos pasan de los seres vivos al ambiente gracias a una cadena de procesos de elaboración y destrucción de los mismos en forma cíclica. Daniel et al. (2019) menciona que:

El ciclo biogeoquímico se caracteriza por la diferente distribución de los nutrientes en cada compartimento del ecosistema y en la velocidad del flujo entre éstos. La interacción entre los organismos y su ambiente, así como la disponibilidad y uso de cada nutriente, va a determinar los procesos de dicho ciclo.

Los organismos vivos necesitan de 31 a 40 elementos químicos, donde el número y tipos de estos elementos varía en cada especie (Remick & Helmann, 2023). El ciclo biogeoquímico fue definido por Rodin y Bazilevich “como el paso de los elementos del suelo y la atmosfera a los organismos vivientes, su transformación en complejos nuevos y su retorno al suelo y a la atmosfera” (Salazar Iglesias, 2008).

Los ciclos biogeoquímicos se refieren a las vías a través de las cuales elementos y compuestos, como el carbono, el nitrógeno, el fósforo y otros, circulan y se reciclan entre los organismos vivos, la atmósfera, la hidrosfera, la geosfera y otros reservorios de la Tierra. Estos ciclos involucran varios procesos biológicos, geológicos y químicos que regulan el movimiento y la transformación de elementos dentro de los ecosistemas y el medio ambiente de la Tierra. En los ciclos biogeoquímicos, la retroalimentación se refiere a los mecanismos mediante los cuales los cambios en un componente o proceso dentro de un ciclo influyen en otros componentes o procesos. Conduce a una respuesta que puede amplificar o amortiguar el cambio inicial. En este sentido, la retroalimentación puede ser positiva o negativa. La retroalimentación positiva ocurre cuando un cambio en componentes o procesos amplifica o refuerza ese cambio, creando un bucle que se refuerza a sí mismo. La retroalimentación positiva puede generar efectos en cascada

que intensifican o aceleran un proceso o alteración particular en el sistema. Por el contrario, la retroalimentación negativa ocurre cuando cambios en uno o varios componentes o procesos desencadenan una respuesta que contrarresta o se opone al cambio inicial, manteniendo o restableciendo así el equilibrio. De hecho, la retroalimentación negativa es un mecanismo estabilizador que ayuda a regular y mantener condiciones estables.

La comprensión de los ciclos biogeoquímicos es fundamental para comprender los intrincados mecanismos que sustentan la vida en nuestro planeta, esta comprensión es necesaria para un ingeniero ambiental abordar los desafíos relacionados con la gestión de recursos naturales, el diseño de sistemas de tratamiento y la conservación de ecosistemas, contribuyendo así a la protección y preservación del medio ambiente.

Estos ciclos, una amalgama de procesos biológicos, geológicos y químicos, constituyen la esencia misma de la dinámica ambiental terrestre. Desde la respiración de las plantas hasta las violentas erupciones volcánicas, desde la majestuosidad de los océanos hasta la humilde descomposición de la materia orgánica en el suelo, cada fenómeno y cada elemento contribuyen de manera interconectada a mantener el equilibrio del ecosistema global.

Los nutrientes esenciales, como el carbono, el nitrógeno y el fósforo, son protagonistas en este vasto escenario de intercambio constante. Estos elementos, en su viaje a través de los organismos vivos y los componentes abióticos del medio ambiente, dan forma a los ciclos que sustentan la vida. Desde su captura por parte de las plantas hasta su liberación nuevamente al medio ambiente, los nutrientes siguen una coreografía precisa, alimentando el flujo vital de la biosfera. Cuantificar los ciclos biogeoquímicos es difícil debido a las muchas sustancias químicas involucradas y las tasas variables y estequiometrías que son característico de las reacciones ambientales. Un medio conveniente para determinar las cantidades y flujos generales de compuestos orgánicos en los ciclos naturales (Hedges, 1992)

La capacidad de un sistema, como un ecosistema o un organismo, para mantener la estabilidad y el equilibrio internos frente a fluctuaciones o perturbaciones externas. En los ciclos biogeoquímicos, la homeostasis (Estado de equilibrio entre todos los sistemas del cuerpo necesarios para sobrevivir y funcionar de forma adecuada) (Diccionario de cáncer del NCI - NCI, 2011); implica equilibrar y regular las concentraciones

elementales, el flujo de energía y otros factores dentro de los ecosistemas, asegurando un entorno relativamente estable y adecuado para que persista la vida (Huang et al., 2024).

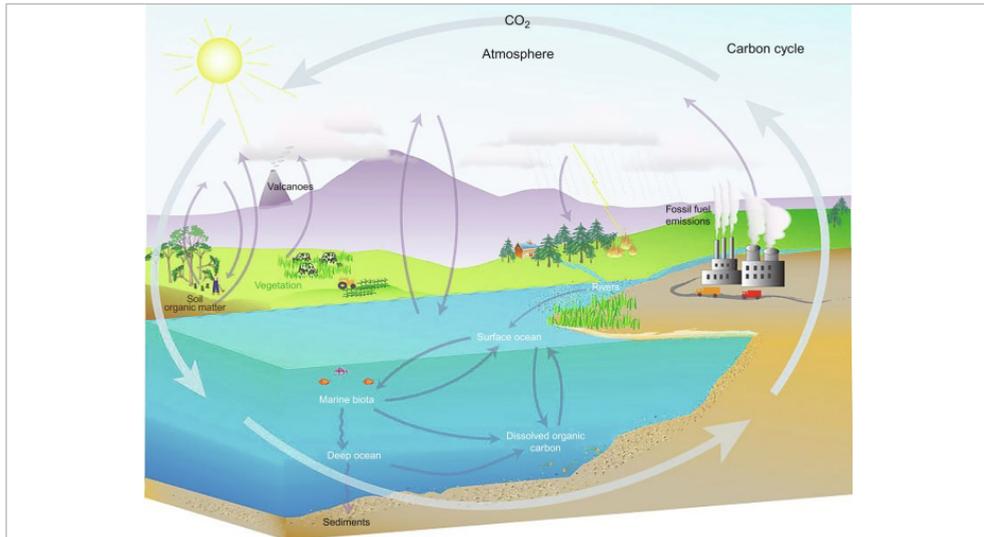
Para reforzar esto Morris (2004), menciona que el ciclo biogeoquímico implica además, las transferencias externas de elementos entre diferentes componentes de un sistema forestal, por ejemplo, la absorción de nutrientes del suelo y su retorno mediante la caída de las hojas, la caída de las ramas, el crecimiento y la muerte de las raíces, o mediante la mortalidad de los árboles, es un componente importante del ciclo biogeoquímico de los nutrientes; los nutrientes devueltos al suelo de esta manera no están disponibles para la reutilización de las plantas hasta que se produce la descomposición y los nutrientes se convierten de formas orgánicas a minerales, un proceso denominado mineralización, junto ello, la mineralización de nutrientes a partir de la materia orgánica del suelo del bosque juega un papel importante en el suministro de nutrientes disponibles para el crecimiento del bosque, también se incluye en el ciclo biogeoquímico el lavado de nutrientes de las hojas y el tejido del tallo y su retorno al suelo en forma de precipitación que cae a través del dosel o fluye hacia el tallo como flujo del tallo.

Estos ciclos describen el movimiento de materia entre los principales reservorios de la Tierra: la atmósfera, la biosfera terrestre, los océanos y la geosfera (suelo, sedimentos y rocas), los seis elementos más comunes que componen las moléculas orgánicas (la columna vertebral de las formas de vida) son carbono, nitrógeno, hidrógeno, oxígeno, fósforo y azufre. Estos elementos residen en los diferentes reservorios en diferentes grados y constan de una variedad de formas químicas tanto orgánicas como inorgánicas.

Por ejemplo, el carbono, es un elemento esencial en los cuerpos de todos los organismos vivos y una fuente esencial de energía para muchos organismos, en forma de CO₂ en la atmósfera es un gas de efecto invernadero que ayuda a regular la temperatura de la tierra para hacerla habitable para la vida; el carbono, en forma de petróleo, gas natural y carbón, es una fuente fundamental de energía para las actividades humanas. El carbono también es un elemento clave para la fabricación de productos cotidianos como los plásticos, también es fundamental para los problemas actuales del cambio climático global.

1. El ciclo del carbono

Figura 7
El ciclo del carbono.



Fuente: National Oceanic and Atmospheric Administration (2019). <http://www.noaa.gov/resource-collections/carbon-cycle>

El carbono circula por el medio ambiente a diferentes escalas espaciales y temporales. El ciclo del carbono se puede caracterizar como dos subciclos interconectados. (1) **Un subciclo consiste en el intercambio de carbono entre organismos vivos**, que se produce en breves escalas de tiempo de días, semanas y meses; el (2) **segundo subciclo comprende el ciclo a largo plazo del carbono a través de procesos geológicos**; es importante marcar que estos dos subciclos están agnados. El movimiento del carbono a través de la cadena alimentaria representa el subciclo rápido del carbono, las plantas transportan carbono de la atmósfera a la biosfera terrestre mediante la fotosíntesis, estos llamados autótrofos (los autótrofos afectan el potencial redox y el pH con un ciclo diurno afectado por la especie, la sombra y la estación (Fitch, 2014) utilizan la energía del sol para convertir el CO₂ en moléculas orgánicas complejas como la glucosa (azúcar), por otro lado, los animales que comen estas plantas digieren las moléculas de azúcar para obtener energía para sus cuerpos en el proceso denominado respiración, estos se llaman heterótrofos (se alimentan de materia orgánica no viva del suelo o forman asociaciones simbióticas con plantas, insectos u otros microorganismos del suelo (Bruns, 2021).

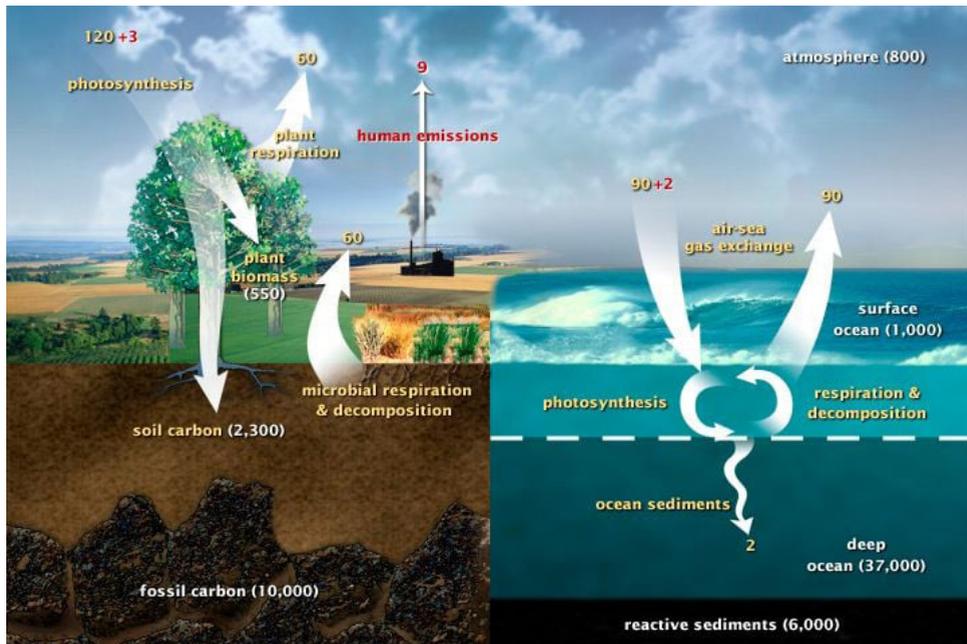
La respiración, la excreción y la descomposición liberan el carbono de regreso a la atmósfera o al suelo, continuando el ciclo del carbono, un ciclo similar ocurre en el océano, excepto que los autótrofos marinos obtienen su carbono en forma disuelta (HCO_3^- : El bicarbonato, es un subproducto del metabolismo del cuerpo (Sánchez Díaz et al., 2018).

Reservorios primarios de carbono en la Tierra

La atmósfera, el océano, la biosfera terrestre (tierra) y la geosfera es generalmente muy lento y ocurre en escalas de cientos a miles de años o más, el dióxido de carbono es la principal forma de carbono en la atmósfera, el nivel de dióxido de carbono en la atmósfera está muy influenciado por el intercambio entre ésta y los reservorios marinos y terrestres. El dióxido de carbono de la atmósfera se disuelve en el océano, tras lo cual se transforma en diferentes formas (Figura 8). El fitoplancton (El fitoplancton adquiere micronutrientes del agua de mar, lo que deja una huella en la distribución de oligoelementos en el mar (Schlesinger & Bernhardt, 2013), convierte el carbono a través de la fotosíntesis y se convierte en fuente de alimento para organismos de nivel superior, algunos organismos combinan carbono con iones de calcio en el agua de mar para formar carbonato de calcio (CaCO_3), la profundidad de compensación de la calcita (CCD) es esa línea de separación donde la solubilidad en agua de los carbonatos es igual a su excreción de carbonato (Haldar, 2013), un componente importante de las conchas de los organismos marinos. Los organismos marinos mueren y eventualmente forman sedimentos en el fondo del océano. Durante muchos cientos de miles de años, el sedimento se somete a procesos geológicos para formar piedra caliza y otras rocas sedimentarias marinas. Estas formas sólidas de carbono en el fondo del océano representan la mayor reserva de carbono de la Tierra.

Figura 8

El ciclo carbono del oceano.



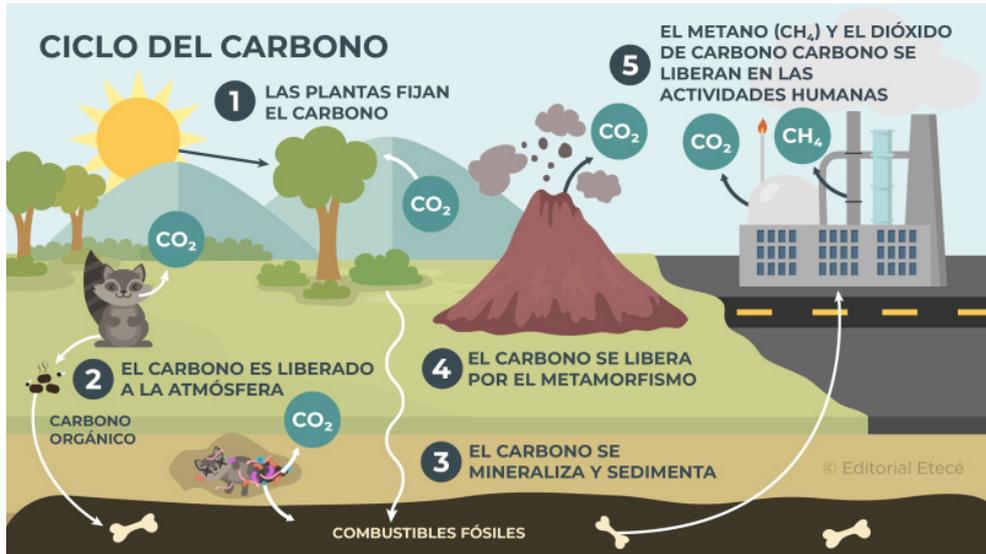
Fuente: (Meteored, 2019). <https://www.energy.gov/science/ber/biological-and-environmental-research>

En la tierra, el carbono existe en plantas y animales vivos generado a través de la red alimentaria, como se analizó anteriormente, la transferencia de carbono entre la tierra y la atmósfera se produce mediante procesos de fotosíntesis y respiración asociados con estos organismos vivos. Además, las actividades humanas, como el consumo de combustibles fósiles, son otra fuente de carbono para la atmósfera. Ambas fuentes se representan en la figura 4. Estos procesos de transferencia ocurren en escalas de tiempo relativamente cortas, asimismo, otra forma de transferir carbono de la tierra a la atmósfera es a través de volcanes y otros sistemas geotérmicos ya sea que el sistema geotérmico sea natural o artificial, la transferencia de calor es el fenómeno más importante (Toth, 2017); por otro lado, los sedimentos y rocas que contienen carbono en el fondo del océano se mueven profundamente dentro de la Tierra mediante el proceso de subducción, que es el movimiento de una placa tectónica (las placas tectónicas son segmentos o trozos de la corteza terrestre y el manto superior que en conjunto constituyen la litosfera (Guo, 2021) debajo de otra. Estos materiales pueden transformarse en roca

fundida (magma) bajo las altas temperaturas y presiones presentes a gran profundidad. Este proceso puede conducir a la formación de volcanes, que liberan carbono en forma de CO_2 al entrar en erupción. Es evidente que este proceso se produce a lo largo de muchos cientos de miles o millones de años.

Figura 9

Ciclo del carbono.



Fuente: (Ondarse Álvarez, 2024)

El carbono se almacena en el suelo como resultado de la descomposición de organismos vivos o de la erosión de rocas y minerales terrestres. El ciclo del carbono puede ser bastante complejo en el subsuelo poco profundo, como se muestra en la figura 5; el carbono se almacena a mayor profundidad bajo tierra en forma de restos descompuestos de plantas y animales que se han convertido en petróleo, gas natural, carbón y esquisto bituminoso (una retorta en la que la pizarra bituminosa se descompone térmicamente en presencia de hidrógeno bajo presión (Sanati et al., 2022). Cuando se hace mención a la existencia de carbono en el suelo es para representar el contenido de materia orgánica que es el propio carbono orgánico, sin que del mismo forme parte el carbono de la hojarasca o mantillo que se localizan sobre el suelo. El carbono orgánico en los ecosistemas terrestres del suelo representa un gran almacén de carbono en la naturaleza. La operatividad del carbono en el suelo está su-

peditado a la actividad microbiana biológica, ya que gran parte de estos microorganismos son heterotróficos, por lo tanto, existe mayor demanda de compuestos orgánicos preformados.

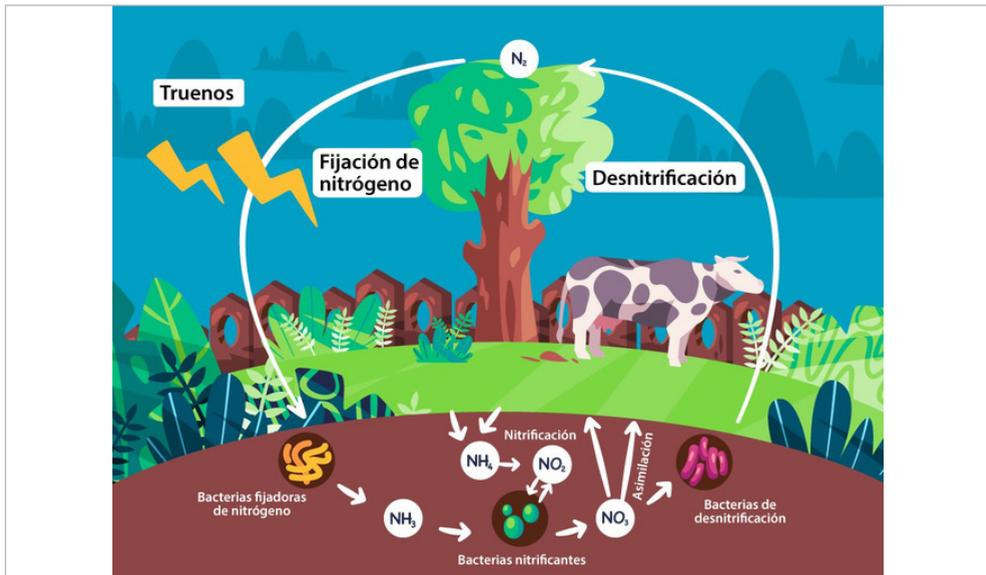
2. El ciclo del nitrógeno

Es otro ciclo biogeoquímico crítico para la vida, podría decirse que el ciclo del nitrógeno es el segundo ciclo más importante, después del ciclo del carbono, para los organismos vivos (Burt, 2013).

El nitrógeno es especialmente importante para la dinámica de los ecosistemas porque muchos procesos de los ecosistemas, como la producción primaria y la descomposición, están limitados por el suministro disponible de nitrógeno. Si bien es un elemento esencial, la gran mayoría de los organismos no pueden hacer uso directo de la fuente principal de nitrógeno, el gas nitrógeno (N_2), en la atmósfera. La conversión de N_2 en una forma más utilizable de nitrógeno, el amoníaco, se lleva a cabo mediante bacterias fijadoras de nitrógeno. Una vez que esto ocurre, varios procesos transfieren el nitrógeno dentro del ecosistema y, en última instancia, de regreso a la atmósfera (Figura 10).

Figura 10

El ciclo del nitrógeno.



Fuente: Rhoton (2013).

La actividad humana puede liberar nitrógeno al medio ambiente por dos medios principales, uno es mediante la combustión de combustibles fósiles, que libera óxidos de nitrógeno (los óxidos de nitrógeno (NO_x) se producen por la reacción de los compuestos nitrogenados contenidos en el carbón y también por la reacción del nitrógeno del aire con el oxígeno utilizado en el proceso de combustión (Suárez-Ruiz & Ward, 2008) a la atmósfera, el segundo es mediante el uso de fertilizantes que contienen compuestos de nitrógeno y fósforo (un exceso de compuestos de fósforo en las aguas superficiales provoca eutrofización y proliferación de algas (Biron, 2020) en la agricultura. El nitrógeno puede ser absorbido por la escorrentía superficial durante las precipitaciones y eventualmente depositarse en lagos, arroyos y ríos. Un efecto importante del escurrimiento de fertilizantes es la eutrofización (aumento del aporte de nutrientes a las aguas superficiales hasta el punto de un enriquecimiento excesivo, con el correspondiente aumento de la productividad primaria y los efectos negativos relacionados (Smith et al., 2006), un proceso mediante el cual los nutrientes del escurrimiento provocan el crecimiento excesivo de algas y una serie de problemas resultantes, así también los ciclos del fósforo y del azufre (el ciclo del azufre es un problema particular en los sistemas de alcantarillado de aguas residuales donde es responsable de la pudrición de la corona (Gautam et al., 2021) son otros ciclos biogeoquímicos críticos (Brusseau, 2019).

3. El ciclo del azufre

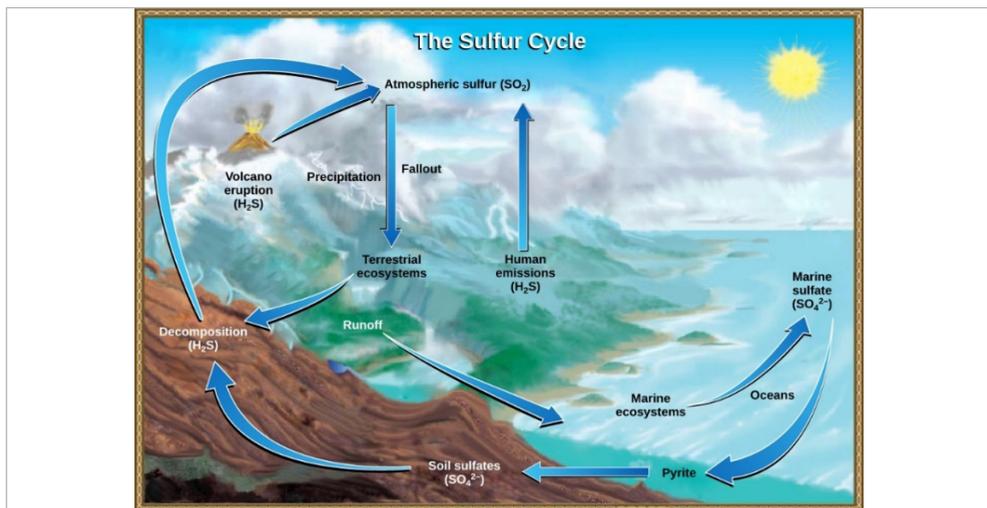
El azufre es el octavo elemento más abundante en la atmósfera solar y el decimocuarto elemento más abundante en la corteza terrestre. El azufre está presente en varios de los grandes compartimentos ambientales de la Tierra. El compartimento litosférico es el más grande y contiene aproximadamente el 95% de este elemento. El segundo compartimento más grande es la hidrosfera y los océanos de la Tierra contienen aproximadamente el 5% del azufre total. El sulfato es el segundo anión más abundante en el agua de mar. Los otros compartimentos en los que se encuentra azufre juntos comprenden <0,001% del azufre restante.

El ciclo del azufre, junto con el ciclo del carbono y el nitrógeno, se distingue de la mayoría de los demás ciclos minerales (p. ej., P, Fe, Si) por exhibir transformaciones de formas gaseosas a iónicas (acuosas o sólidas). Cada una de las transformaciones depende de condiciones apropiadas de oxígeno celular y ambiental (o redox). Por tanto, el ciclo de estos elementos depende de la presencia de gradientes de oxígeno (o redox).

Estos gradientes varían en tamaño desde los más pequeños, que pueden generarse en distancias de sólo unos pocos micrómetros, por ejemplo, bio-películas y sedimentos, hasta zonas más grandes (unos pocos milímetros), como en las migajas del suelo y las esteras microbianas (el desarrollo de tapetes microbianos requiere un ambiente con bajas tasas de sedimentación que permitan el movimiento vertical de microorganismos fotoautótrofos hacia la superficie del sedimento para obtener luz solar óptima sin ser enterrados (Cuadrado, 2017). En circunstancias excepcionales, estos gradientes pueden extenderse a lo largo de varias decenas de metros, por ejemplo, en manantiales geotérmicos, lagos estratificados estables o emisarios de alcantarillado.

De particular interés para el ciclo del azufre son los gradientes pronunciados presentes en condiciones microambientales o microzonales, ya que permiten interacciones entre células que normalmente no pueden coexistir, es decir, reductores de sulfato anaeróbicos y oxidantes de sulfuro aeróbicos. En algunos casos, son posibles reacciones cíclicas muy claras. El ejemplo más claro es el ciclo del azufre como se ilustra en la figura 6. Los hábitats con un ciclo completo del azufre se conocen como sulfureta, ambos grupos de bacterias pueden encontrarse cerca del límite entre los hábitats aeróbico y anaeróbico, y ninguno de los organismos puede crecer en el espacio del otro. Sin embargo, dependen totalmente de los compuestos de azufre que se difunden entre ellos (Lens, 2009).

Figura 11
Ciclo del azufre



Fuente: Ha et al. (2020).

4. El ciclo del fósforo

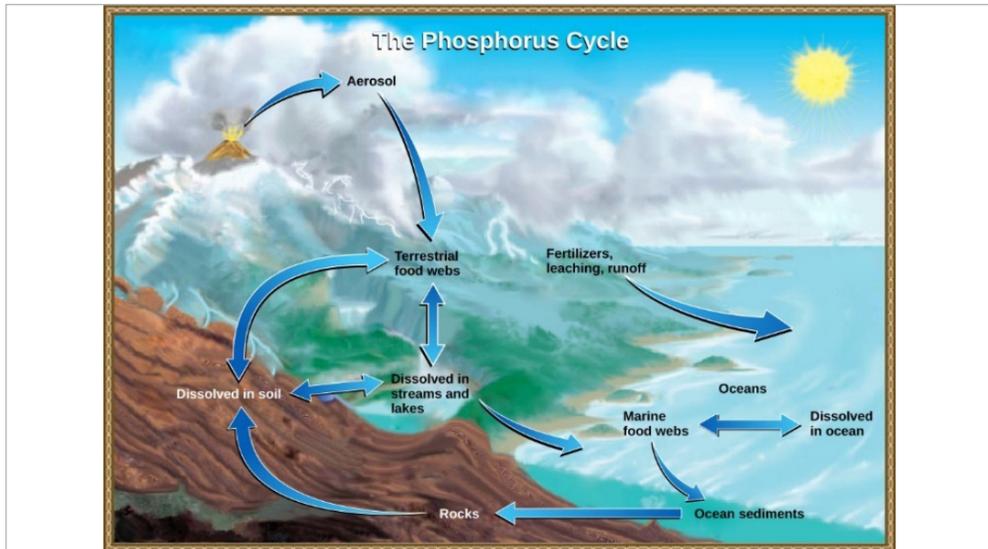
Varias formas de nitrógeno (gas nitrógeno, amonio, nitratos, etc.) participaron en el ciclo del nitrógeno, pero el fósforo permanece principalmente en forma de ion fosfato (PO_4^{3-}). Además, a diferencia del ciclo del nitrógeno, en la atmósfera no hay ningún tipo de fósforo. El fósforo se utiliza para producir ácidos nucleicos y fosfolípidos que componen las membranas biológicas. Las rocas son un reservorio de fósforo y estas rocas tienen su origen en el océano. Los sedimentos oceánicos que contienen fosfatos se forman principalmente a partir de los cuerpos de los organismos oceánicos y de sus excreciones. Sin embargo, las cenizas volcánicas, los aerosoles y el polvo mineral también pueden ser fuentes importantes de fosfato. Luego, este sedimento se mueve hacia la tierra a lo largo del tiempo geológico mediante el levantamiento de la superficie de la Tierra (figura 12). El movimiento de fosfato del océano a la tierra y a través del suelo es extremadamente lento; el ion fosfato promedio tiene un tiempo de residencia en el océano de entre 20.000 y 100.000 años. El movimiento de fosfato del océano a la tierra y a través del suelo es extremadamente lento; el ion fosfato promedio tiene un tiempo de residencia en el océano de entre 20.000 y 100.000 años (Mackey & Paytan, 2009).

Las aves marinas desempeñan un papel único en el ciclo del fósforo. Estas aves absorben fósforo de los peces del océano. Sus excrementos en la tierra (guano) contienen altos niveles de fósforo y en ocasiones se extraen para uso comercial. Un estudio de 2020 estimó que los servicios ecosistémicos (procesos y productos naturales que benefician a los humanos) proporcionados por el guano valen 470 millones de dólares al año.

La erosión de las rocas libera fosfatos en el suelo y las masas de agua. Las plantas pueden asimilar los fosfatos del suelo e incorporarlos a moléculas orgánicas, poniendo el fósforo a disposición de los consumidores en las redes alimentarias terrestres. Los hongos y las bacterias descomponen los desechos y los organismos muertos, liberando fosfatos al suelo. Parte del fosfato se lixivia del suelo y llega a los ríos, lagos y al océano. Los productores primarios en las redes alimentarias acuáticas, como las algas y las bacterias fotosintéticas, asimilan el fosfato y, por lo tanto, el fosfato orgánico está disponible para los consumidores en las redes alimentarias acuáticas. Al igual que en las redes alimentarias terrestres, el fósforo se intercambia recíprocamente entre el fosfato disuelto en el océano y el fósforo orgánico en los organismos marinos.

El movimiento del fósforo de las rocas a los organismos vivos es normalmente un proceso muy lento, pero algunas actividades humanas aceleran el proceso. Las rocas que contienen fosfato a menudo se extraen para utilizarlas en la fabricación de fertilizantes y detergentes. Esta producción comercial acelera enormemente el ciclo del fósforo. Además, la escorrentía de las tierras agrícolas y la liberación de aguas residuales a los sistemas de agua pueden provocar una sobrecarga local de fosfato. La mayor disponibilidad de fosfato puede provocar un crecimiento excesivo de algas. Esto reduce el nivel de oxígeno, provocando eutrofización y destrucción de otras especies acuáticas (Mackey & Paytan, 2009).

Figura 12
Ciclo del fósforo



Fuente: Ha et al. (2020).

Perturbaciones antropogénicas en los ecosistemas y ciclos biogeoquímicos.

Las actividades humanas han aumentado considerablemente los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera y los niveles de nitrógeno en la biosfera, los ciclos biogeoquímicos alterados combinados con el cambio climático aumentan la vulnerabilidad de la biodiversidad, la seguridad alimentaria, la salud humana y la calidad del agua a un clima cambiante (Baron et al., 2013). El cambio climático continúa amenazando a los bosques y

sus servicios ecosistémicos, al tiempo que altera sustancialmente los regímenes de perturbaciones naturales. Los cambios en la cobertura terrestre y la consiguiente gestión implican discrepancias en el secuestro de carbono proporcionado por los ecosistemas forestales y su contabilidad (Lakyda et al., 2019). La alteración del paisaje puede alterar la disponibilidad de elementos y, por tanto, las tasas de ciclo biogeoquímico (Keiser et al., 2016).

Las perturbaciones en los sistemas terrestres son eventos discretos que reducen la biomasa productora primaria y regulan fuertemente los flujos de materiales y energía. En varios estudios durante las últimas décadas se ha documentado un tamaño o gravedad cada vez mayores de una variedad de tipos de perturbaciones, como tormentas e incendios forestales. Los efectos sinérgicos de las interacciones entre las características de las perturbaciones, los parámetros del ciclo vital y el cambio climático son de particular preocupación, porque las perturbaciones tienen consecuencias potencialmente importantes para el ciclo del carbono (C) y los nutrientes y para la hidrología (McLauchlan et al., 2014).

Menciona Keiser et al. (2015), la historia de las perturbaciones forestales determinó la nitrificación y la mineralización de nitrógeno estaban correlacionadas, con el efecto aparentemente mediado por el carbono disponible microbianamente. Si bien es cierto los bosques no perturbados tenían mayor carbono disponible, lo que desmembraba la potencial nitrificación clara de la potencial mineralización neta de nitrógeno. Por el contrario, las cuencas perturbadas tenían menor carbono disponible y las tasas de nitrificación estaban fuertemente correlacionadas con las de mineralización de nitrógeno.

Estos datos sugieren que una historia de perturbaciones a escala del paisaje reduce la disponibilidad de carbono en el suelo, lo que aumenta la disponibilidad de amonio para los nitrificadores a microescala. La disponibilidad de carbono en el suelo a nivel del paisaje parece entonces determinar la articulación de procesos biogeoquímicos autótrofos (nitrificación) y heterótrofos (mineralización de nitrógeno) y, por tanto, la relación entre el ciclo del carbono y el nitrógeno en los suelos está estrechamente intrínseca.

La gestión forestal inadecuada (como, por ejemplo, talas irrazonables en masas afectadas por agentes biogénicos) suele aumentar las emisiones de carbono. Los impactos de perturbaciones como, los rápidos cambios en la

cubierta terrestre y forestal son características inherentes a las regiones boscosas. Esto también influye en gran medida en las funciones y servicios de los ecosistemas forestales, en particular en su ciclo del carbono y otros. Los incendios forestales, también pueden tener un impacto sustancial en las emisiones de carbono. Sin embargo, el alcance, la frecuencia y la gravedad de estos agentes perturbadores no son sistemáticos en una escala espacial local y temporal corta (Lakyda et al., 2019).

A corto plazo, las perturbaciones de los ecosistemas pueden tener efectos muy fuertes sobre los procesos internos de los ecosistemas y la estructura de las comunidades vegetales en comparación con los efectos a más largo plazo del cambio climático; el calentamiento indujo pequeños aumentos en las tasas de mineralización y resultó en una mayor lixiviación de nitrógeno de la capa orgánica del suelo, ello aumento la lixiviación de nitrógeno de la capa de suelo orgánico, que se volvió a inmovilizar en la capa de suelo mineral a medida que el calentamiento estimulaba el crecimiento de las plantas y, por lo tanto, aumentaba la inmovilización de nitrógeno (Beier et al., 2004).

Las actividades humanas pueden afectar significativamente los ciclos biogeoquímicos (*Fundación CK-12*), que son los procesos naturales que reciclan nutrientes y elementos dentro de los ecosistemas. Algunos de los efectos principales incluyen:

1. Deforestación:

La eliminación de grandes áreas de bosques altera el ciclo del carbono, ya que los árboles desempeñan un papel crucial en la absorción de dióxido de carbono de la atmósfera y su almacenamiento como biomasa. Esto conduce a mayores niveles de gases de efecto invernadero y contribuye al cambio climático.

2. Quema de combustibles fósiles

La quema de combustibles fósiles libera grandes cantidades de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero a la atmósfera, alterando el ciclo del carbono y contribuyendo al calentamiento global.

3. Agricultura

El uso de fertilizantes en la agricultura puede provocar un exceso de nutrientes, como nitrógeno y fósforo, en el suelo. Esto puede causar

eutrofización en cuerpos de agua cercanos, alterando los ciclos del nitrógeno y el fósforo y provocando proliferación de algas nocivas y agotamiento del oxígeno en los ecosistemas acuáticos.

4. Urbanización

La construcción de ciudades e infraestructuras alteran los ciclos biogeoquímicos naturales al alterar el flujo de agua y nutrientes en los ecosistemas. Esto puede provocar cambios en la disponibilidad de recursos para plantas y animales, así como un aumento de la contaminación y la producción de desechos.

5. Actividades industriales

La liberación de contaminantes y desechos de procesos industriales puede contaminar el aire, el agua y el suelo, alterando el ciclo de elementos y nutrientes en los ecosistemas. Esto puede tener efectos negativos en la salud tanto de los seres humanos como de la vida silvestre.

En resumen, las actividades humanas pueden tener impactos significativos en los ciclos biogeoquímicos, provocando cambios en el funcionamiento de los ecosistemas y potencialmente contribuyendo a problemas ambientales globales como el cambio climático y la pérdida de biodiversidad.

Los Ciclos Biogeoquímicos son las vías por las cuales elementos como el carbono, fósforo, nitrógeno y azufre, o compuestos como el agua, fluyen entre los organismos vivos y el medio ambiente. Las actividades humanas pueden alterar estos ciclos siendo producir o consumir en diferentes cantidades. Por ejemplo, los fertilizantes agrícolas y la erosión del suelo han aumentado sustancialmente los niveles de nitrógeno y fósforo biológicamente disponibles en los sistemas naturales.

El ciclo biogeoquímico de los gases de efecto invernadero globales es continuo, lo que significa que se debe adoptar un enfoque sistémico para comprender las fuentes y predecir el cambio climático (Vallero, 2022). Estos ciclos elementales son responsables de la constante transferencia y transformación de materia y energía entre la biosfera y los demás reservorios activos del planeta. Sin lugar a duda, durante el avance de un ciclo biogeoquímico, una serie de especies moleculares (“nutrientes” ecológicos) son constantemente transferidas y alteradas químicamente.

En los últimos años, por ejemplo, el plástico, un nuevo material, ha comenzado a participar en los ciclos biogeoquímicos. Más que simplemente participar, los microplásticos interfieren en el flujo normal de estos procesos en la medida en que pueden bloquear la transferencia de algunos elementos y servir de atajo para otros, estos nuevos materiales pueden aumentar la biodisponibilidad de los contaminantes y, por tanto, interferir con las actividades fisiológicas. Los resultados de esta interferencia aún no han sido evaluados completamente, por lo que, se deben tomar medidas urgentes para mitigar los efectos negativos de esta invasión (Almeida et al., 2023) a series of molecular species (ecological “nutrients”.

Para que quede más clara la importancia de resguardar de manera sostenible los ecosistemas, los ciclos biogeoquímicos terrestres y oceánicos, son componentes clave del sistema climático de la Tierra, os flujos superficiales de muchos gases de efecto invernadero y precursores de aerosoles están controlados por procesos físicos y biogeoquímicos y son sensibles a los cambios en el clima y la composición atmosférica. Lo más importante es que los procesos biogeoquímicos controlan las concentraciones atmosféricas de los principales gases de efecto invernadero (CO_2 , CH_4 y N_2O). Según las estimaciones del Presupuesto Mundial de Carbono de 2015, desde 1870, las emisiones de CO_2 procedentes de la quema de combustibles fósiles han liberado alrededor de 400 ± 20 GtC (Gigatoneladas de carbono) a la atmósfera, mientras que se estima que el cambio en el uso de la tierra ha liberado 145 ± 50 GtC adicionales. De estas emisiones antropogénicas acumuladas de CO_2 , 230 ± 5 GtC se han acumulado en la atmósfera, mientras que los ecosistemas oceánicos y terrestres han absorbido 155 ± 20 GtC y 160 ± 60 GtC, respectivamente. Por lo tanto, la tierra y los océanos están absorbiendo alrededor de la mitad del carbono emitido por la actividad humana, mitigando significativamente la acumulación de CO_2 en la atmósfera y el cambio climático. En ausencia de estos sumideros de carbono, el CO_2 atmosférico actual ya sería aproximadamente el doble de la concentración de CO_2 preindustrial, con un calentamiento global asociado probablemente superior a 2°C (Finzi et al., 2011)nitrogen (N

CAPÍTULO 4

DAÑO AMBIENTAL

Los daños ambientales pueden clasificarse en daños indirectos a las personas o daños al ambiente (daño ambiental estricto sensu) y daños que afectan directamente a la colectividad de seres vivos. Esta aclaración nos permite comprender que el daño ambiental presenta numerosas especificidades y podría estar en el atributo ajeno al factor humano. Si el Derecho no distingue entre los dos tipos de daños ambientales, no podrá, por tanto, reconocer los rasgos representativos que diferencian el daño general del daño al medio ambiente.

La importancia de la definición de “daño ambiental” se basa en la responsabilidad de los Estados de prevenir, reducir y compensar el daño ambiental ocasionado. En definitiva, la definición única de “daño ambiental” juega un papel activo en la protección ambiental de los estados (Khalatbari et al., 2016).

Los daños ambientales se diferencian en dos tipos en función de su conexión con el factor humano: daños indirectos a los humanos y daños directos a los humanos. Ambos tipos de daño ambiental dañan a los humanos como miembros de un sistema holístico, y la bifurcación no implica que un tipo pueda separarse del otro. Se considera daño directo al ser humano cuando afecta el patrimonio o la salud de las personas (Valenzuela Rendón, 2015).

Concepto

Una de las originarias definiciones de “daños” en el derecho internacional la hizo la Convención sobre responsabilidad internacional por daños causados por objetos espaciales de 1972 (Naciones Unidas, Serie de Tratados,

vol. 961, pág. 187) (ONU, 2010). Según el artículo 1° de esta Convención, “daños” significa:

La pérdida de vidas, lesiones personales u otros perjuicios a la salud; o pérdida o daño a bienes de estados o de personas, naturales o jurídicas, o a bienes de organizaciones internacionales intergubernamentales.

En este argumento, los daños incluyen todos los aspectos de la vida humana y el ambiente natural. El Convenio sobre responsabilidad civil por daños causados durante el transporte de mercancías peligrosas por carretera, ferrocarril y buques de navegación interior (CRTD, 1989) en el artículo 1, párr. 10 definió el daño como:

(a) **pérdida de vidas o lesiones personales** a bordo o fuera del vehículo que transporta mercancías peligrosas causadas por esas mercancías;

(b) **pérdida o daño a bienes fuera del vehículo** que transporta mercancías peligrosas causadas por esas mercancías, con exclusión de cualquier pérdida o daño a otros vehículos en el mismo tren de vehículos o cualquier pérdida o daño a bienes a bordo de tales vehículos;

(c) **pérdida o daño por contaminación del medio ambiente** causada por mercancías peligrosas, siempre que la compensación por el deterioro del medio ambiente, salvo el lucro cesante derivado de dicho deterioro, se limite a los costos de las medidas razonables de restablecimiento realmente adoptadas o por adoptar” (en CRTD, 1987).

Esta definición se refería más a los daños causados durante el transporte de mercancías peligrosas mediante transporte; es así que las características particulares del concepto de “daño ambiental” se basan obviamente en la actividad realizada por el hombre mediante la adición de sustancias al ambiente natural tras realizar sus propias actividades (Khalatbari et al., 2016).

Por otro lado, Puentes Brunke (2012) conceptualiza lo siguiente:

Los daños al ambiente, independientemente de los daños a las personas y a la propiedad, son de naturaleza singular e implican un nivel de incertidumbre, además de ser considerado como un evento continuo, mutante y diseminativo que puede ser tanto permanente como progresivo.

Para Bustamante Alsina (1995) el daño ambiental es definido así:

Es toda lesión o menoscabo que atente contra la preservación del entorno –constituido por los recursos naturales vivos, inertes, culturales materiales e inmateriales–, en tanto influya en la calidad de vida, desde el punto de vista del interés humano

EL artículo 142° de la Ley General del Ambiente, Ley N° 28611 - (Ley General del Ambiente, 2005), lo establece como:

“todo menoscabo material que sufre el ambiente y/o alguno de sus componentes, que puede ser causado contraviniendo o no disposición jurídica, y que genera efectos negativos actuales o potenciales”.

Al respecto aclara Puentes Brunke (2012), *“el artículo 142° de la LGAMB suscita una cuestión de fondo: mientras que su apartado 1 parece incluir dentro de la responsabilidad por daños ambientales a los perjuicios ocasionados, no sólo al ambiente considerado en sí mismo sino, también, a la calidad de vida, a la salud o al patrimonio materias distintas; mientras que el apartado 2 distingue en forma expresa el daño ambiental circunscribiéndolo, sin lugar a dudas, sólo a todo menoscabo material que sufre el ambiente y/o algunos de sus componentes. Como se ve, el supuesto de hecho del apartado 1 del artículo 142° parece incluir otro tipo de daños, además del daño ambiental puro. Por otro lado, la consecuencia jurídica atañe sólo al costo de las medidas de prevención y mitigación de daño, pero no se refiere a las de restauración, rehabilitación, reparación o compensación en términos ambientales ni demás indemnizaciones a que pudiera dar lugar el daño generado sobre el ambiente.”*

Acá se ve de manera explícita que el Estado Peruano precisa el menoscabo ambiental, custodial el daño en todas las formas, ocasionalmente nunca se podrá intervenir zonas antes de que se produzca el menoscabo ambiental, entonces, el legislador custodia al ambiente o el deterioro ambiental, nos ampara del “daño” o del “daño ambiental” propiamente.

Desde el punto de vista de la Ingeniería Ambiental, es un poco más simple, lo definen las constituciones diversas, la protección ambiental en todas sus formas para perseverar con la sostenibilidad del flujo de energía responsable de la manutención de un ecosistema, y todo daño es simplemente un tipo de modificación adversa de uno o más de los elementos del sistema ambiental, que afecten directamente al ser humano, o a cualquier ser vivo (si mencionamos solo al hombre estaríamos siendo

mezquinos con todos los seres vivos, recordemos que dentro de los ecosistemas, nosotros formamos parte de él, no sucede a contrario) cada una de estas adversidades aceleran el deterioro del ambiente, provocando que tengamos menos opciones de sobrevivir ante las adversidades naturales. Si lo miramos desde este punto de vista, estaríamos ante la presencia del rebote: Causa: impacto ambiental negativo al ambiente y el Efecto: alteración desfavorable de cada elemento ambiental o de la correspondencia entre ellos, afectando furtivamente al hombre.

Algunas constituciones, por ejemplo, consideran que no existe daño ambiental cuando no existe impacto ambiental negativo (Procuraduría Federal de Protección, 2014)(Ley Federal de Responsabilidad Ambiental de México, artículo 6°), en otras palabras, se debe demostrar el vínculo causal; es decir, especificar en detalle la relación entre el incidente que causa daño al medio ambiente y una modificación adversa producida en el sistema ambiental.

Con la representación de un ejemplo de esta postura: una fábrica que libera benceno a la atmósfera, provocando graves daños al medio ambiente ya que contamina el aire con partículas en suspensión, así como el suelo y el agua cuando esas partículas caen a la tierra. Los demandados prueban que la fábrica utiliza benceno, que las emisiones se producen periódicamente y que las partículas en cuestión caen a la tierra y permanecen en el agua y en el suelo. Sin embargo, no es necesario probar el vínculo causal. Los elementos subjetivos son la parte perjudicada como la parte no perjudicada; ambos pueden ser personas físicas o jurídicas. La especificación de los elementos subjetivos no es una tarea fácil. ¿Cómo podríamos demostrar quién causa el calentamiento global o quién se ve afectado por la lluvia ácida? Es necesario establecer un vínculo causal entre el daño ambiental y la persona física/jurídica que lo causa. Si se especifica mal la causalidad, es probable que el daño causado por una persona o por su propiedad sea atribuido a persona equivocada.

(Stiglitz & Rusconi, 2010), afirma que pueden existir daños de carácter colectivo en el sentido de que el individuo responsable, siendo miembro de un grupo, no puede ser individualizado. Las actividades colectivas causan daños que se puede demostrar que son aún más dañinos que los individuales (Valenzuela Rendón, 2015).

Por ejemplo, Barros señala que es más complejo probar un daño futuro que un daño presente debido a que involucra una eventualidad determinada; a pesar de que el requisito de certeza de la prueba se cumple en la legislación chilena si existe suficiente probabilidad de que se cause el daño, este argumento sigue siendo válido en general (Gazmuri, 2007).

Un concepto fundamental para el estudio de la relación de causalidad en el régimen de responsabilidad por daño ambiental es, como resulta evidente, el de daño ambiental propiamente plasmado. Las peculiaridades que contiene este tipo particular de daño es el que complica el estudio y comprensión del elemento de causalidad, pues son justamente estas particularidades las que ponen en tela de juicio la aplicación pacífica de las teorías clásicas sobre causalidad que son de aplicación frente a hechos dañosos más comunes. Así lo ha puesto de manifiesto Albert Ruda, al señalar que este elemento de la responsabilidad medio es tal vez la cruz más pesada que deben cargar los autores que abordan esta materia, justamente por las particularidades del supuesto de daño ambiental (Sánchez, 2008).

Al respecto, la Ley Federal de Responsabilidad Ambiental de México define el daño ambiental como:

2.- Pérdida, cambio, deterioro, daño, afectación o modificación adversa o mensurable del hábitat, ecosistemas, elementos o recursos naturales, de sus efectos químicos, físicos o biológicos. condiciones, relaciones de interacción entre ellos, así como los servicios ambientales que se prestan (Constitution of the United Mexican States, 1824).

Al ser insumable, en otras palabras, algo que no se puede medir, la significación de este dogma no impide la complicación de cuantificar y valorar los deterioros al ambiente. En la actualidad cualquier sistema legal va orientado correctamente a tomar en consideración toda la amplificación del daño ambiental ocasionado.

En derecho no siempre se encuentra una distinción entre daños ambientales y daños directos a los seres humanos causados por causas ambientales, ya que es un conjunto, el nexo causal muchas veces se ven difusas a la explicación técnica y legal, el daño al ambiente tiene un carácter sui generis, quiere decir, que el daño al ambiente no es de tipo patrimonial, por lo tanto, su cuantificación a un valor monetario es compleja. De manera

general, no todo daño ambiental genera responsabilidad, ya que el mismo hecho de existir en cada espacio es invadido por nuestros residuos (agua, suelo y aire), o sea, contaminamos por el simple hecho de existir, las acciones irracionales que realizamos, tienen directa responsabilidad de daño ambiental, acelerando el menoscabo a los ecosistemas.

Principio de “*alterum non laedere*” (no dañar a los demás)

En principio, (Papayannis, 2014) lo define de la siguiente manera:

El alterum non laedere exige no dañar a otros injustamente. Este deber no es absoluto, en el sentido de que cualquier perjuicio, molestia o pérdida que causamos a nuestro entorno, vecinos, etc., está reprobada por la ley. Pues ello sí haría que la vida en comunidad fuese imposible.

Al trasladarlo a nuestro tema, el menoscabo ambiental no representa una pérdida o daño a la propiedad, pero, esto no significa precisamente que no se logre asignar una cuantía monetaria, el detalle muchas veces es que no es percibido automáticamente el costo de su formación, el precio en el mercado de cada componente que se pueda extraer, y el valor ambiental de un determinado ecosistema ambiental.

El perjuicio ambiental es algo considerablemente dificultoso de ponderar y estimar ya que el ambiente no es un activo mercantilizado en ningún tipo de mercado y por ello, no tiene un valor monetario en sí mismo. De ahí nace la pregunta siguiente: ¿cuánto vale el ambiente? ¿cuánto valió el daño ambiente ocasionado? ¿cuánto costará la reconstrucción del daño al ambiente? etc.

Los daños ambientales no son usualmente cuantificables por diversos motivos prácticos en realidad, como la complicada labor de establecer la magnitud del daño ocasionado, sus secuelas, y posibles mejoras en el futuro, también la carencia de un valor ambiental en el de mercado de cualquiera de los elementos involucrados en el momento de los hechos. Es complejo establecer cuándo y dónde se realiza el impacto del daño ambiental, lo que tiene implicaciones significativas en las tribunas procesales como el plazo de mandato y la emulación del juez.

Ciertos elementos que componen el ambiente pueden clasificarse como *res communes omnium*; pertenecen a la humanidad y no son susceptibles de apropiación: “Cosa de (toda) la comunidad” (Fellmeth & Horwitz, 2011):

El patrimonio común de toda la humanidad, no sujeto a apropiación ni soberanía (...).1 El concepto de daño ambiental depende de nuestra comprensión exclusiva del ambiente.

Dentro de nuestro ordenamiento nacional, la Ley N° 28611, Ley General del Ambiente, ha recogido en el artículo 142° el concepto de daño ambiental, con la finalidad de lograr que este sea de aplicación general para todo el ordenamiento jurídico. En consecuencia, el legislador ha buscado establecer un concepto jurídico normativo que sirva como parámetro para identificar el supuesto denominado “daño ambiental” para la atribución de responsabilidad civil, penal y administrativa. Esta norma ha definido el daño ambiental de la siguiente manera:

Artículo 142.- De la responsabilidad por daños ambientales

142.1 Aquél que mediante el uso o aprovechamiento de un bien o en el ejercicio de una actividad pueda producir un daño al ambiente, a la calidad de vida de las personas, a la salud humana o al patrimonio, está obligado a *asumir los costos* que se deriven de las medidas de prevención y mitigación de daño, así como los relativos a la vigilancia y monitoreo de la actividad y de las medidas de prevención y mitigación adoptadas.

142.2 Se denomina daño ambiental a todo *menoscabo* material que sufre el *ambiente* y/o alguno de sus componentes, que puede ser causado contraviniendo o no disposición jurídica, y que genera efectos negativos actuales o potenciales.

De acuerdo a lo señalado por esta normatividad, el daño ambiental posee ciertos elementos que hay que tener en cuenta para entender su naturaleza. *El primero* de ellos es la existencia de menoscabo material, lo cual significa que el daño ambiental implica un detrimento cualitativo identificable que debe estar presente para considerar que un perjuicio califica como daño ambiental. *En segundo lugar*, el numeral 142.2 menciona que este detrimento recae sobre el ambiente, de manera que el concepto de daño ambiental se refiere a un menoscabo material que recae sobre el medio ambiente, como bien jurídicamente protegido. Sin embargo, el numeral 142.1, al establecer como cláusula normativa general un supuesto de responsabilidad que va más allá de las afectaciones al medio ambiente, haciendo extensiva su aplicación a la calidad de vida, a la salud o al patrimonio de las personas.

Con esto último, el artículo 142° parece incluir dentro de la idea de daño ambiental no solo las afectaciones que pueda sufrir el medio ambiente, entendido como bien jurídicamente protegido de naturaleza difusa, sino también los que puedan sufrir las personas de forma individual. Así, por aplicación de esta norma, en nuestro ordenamiento no cabe hacer una distinción entre los daños ambientales, entendidos como daños ecológicos puros o daños medioambientales puros, y los daños por influjo ambiental, donde se ubican los perjuicios causados en la esfera particular como consecuencia de los daños ecológicos puros, pues para el concepto de daño ambiental establecido en la Ley General del Ambiente, no existe tal distinción.

El tercer elemento es la inexistencia de ilicitud para la atribución de responsabilidad ambiental. Como se puede tasar, el numeral 142.2 del artículo 142° señala de manera expresa que no es necesario que se viole alguna obligación legal u otro tipo de disposición jurídica para que exista responsabilidad por daño ambiental, retirando así el elemento de la antijuricidad para la atribución de responsabilidad. Esto implica que puede existir responsabilidad por daño ambiental aún en los supuestos en los que no se ha incumplido ningún deber jurídico expreso, pues podría producirse aún como consecuencia del ejercicio regular de un derecho. Como veremos más adelante, esto ha llevado a algún sector de la doctrina a entender el supuesto de responsabilidad por daño ambiental a la figura clásica del abuso del derecho, para justificar que pueda existir responsabilidad aún dentro del margen de la legalidad (Vidal Ramos, 2013).

El último elemento del daño ambiental definido por el artículo 142° son los efectos negativos actuales o potenciales que este perjuicio puede generar para el medio ambiente o para la esfera particular de las personas. La doctrina no se ha concentrado tanto en este aspecto, sin embargo, es posible encontrar ciertas referencias claras a este elemento en lo que se refiere a la responsabilidad por riesgo, pues además de la exigencia de un menoscabo material, es posible encontrar otros perjuicios que, aunque no se hayan producido ciertamente al mismo tiempo que el menoscabo, pueden entrañar posibles daños futuros (riesgo) que el derecho debe prevenir (San Martín Villaverde & Ruiz-Rico, 2015). Fuera de lo anterior, por parte de la autoridad ambiental, el requisito de efectos negativos reales o potenciales

ha motivado también la elaboración de directivas interpretativas por parte del Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental – OEFA. Así, la (*Resolución N° 010-2013-OEFA/CD*, 2013), que aprobó los lineamientos para la aplicación de medidas correctivas, establece, sobre la base del artículo 142°, una distinción entre daños reales y daños potenciales que se viene aplicando hasta el día de hoy. En ese sentido, el numeral II de estos lineamientos se ha definido tales conceptos de la siguiente manera:

a.1) Daño real o concreto

Detrimento, pérdida, impacto negativo o perjuicio actual y probado, causado al ambiente y/o alguno de sus componentes como consecuencia del desarrollo de actividades humanas.

a.2) Daño potencial

Contingencia, riesgo, peligro, proximidad o eventualidad de que ocurra cualquier tipo de detrimento, pérdida, impacto negativo o perjuicio al ambiente y/o alguno de sus componentes como consecuencia de fenómenos, hechos o circunstancias con aptitud suficiente para provocarlos, que tienen su origen en el desarrollo de actividades humanas.

En la actualidad, la definición de daño ambiental contenida en el artículo 142° de la Ley General del Ambiente y las disposiciones normativas, además de los criterios jurisprudenciales que desarrollan tales disposiciones, ha sido objeto de cuestionamiento por cierta doctrina, debido a que esta norma ha permitido que se deje de exigir la existencia de un daño real y concreto para la atribución de responsabilidad ambiental (Puente Brunke, 2012). Sobre la base de esta crítica, cuya profundización debe ser objeto de un estudio más extenso que no corresponde realizar en este trabajo, construiré la idea de daño ambiental que debe sustentar la interpretación del nexo de causalidad que se explica en este estudio.

3.1. El bien jurídico afectado

Como hemos visto en la parte introductoria de este punto, el bien jurídico afectado por el daño ambiental es el medio ambiente, entendido como bien constitucionalmente protegido en nuestro ordenamiento. La comprensión de lo que debemos considerar medio ambiente para efectos

jurídicos debe partir desde la categoría jurídica que nuestro ordenamiento le ha atribuido. Así, nuestra *Constitución Política del Perú (1993)* reconoce en el inciso 22 del artículo 2° el derecho fundamental al medio ambiente equilibrado, otorgándole así un estatus jurídico de protección idéntico al de otros derechos fundamentales amparados dentro de nuestro sistema jurídico. Esta norma establece lo siguiente:

Artículo 2.- Toda persona tiene derecho:

22. A la paz, a la tranquilidad, al disfrute del tiempo libre y al descanso, así como a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida.

Por otro lado, dentro del título de la Constitución dedicado al régimen económico del Estado, dentro del capítulo referido a los recursos naturales, el artículo 67° le ha otorgado al Estado el rol de crear y ejecutar la política nacional del ambiente, además de promover el uso sostenible de los recursos naturales. El artículo 67° señala lo siguiente:

Artículo 67°.- El Estado determina la política nacional del ambiente. Promueve el uso sostenible de sus recursos naturales.

Si bien el artículo 67° establece que el Estado promueve el uso sostenible de sus recursos naturales, resulta evidente que el término uso sostenible se aplica de manera general a todas las actividades productivas que se desarrollen dentro de nuestro país, con prescindencia de que se trate de una actividad de explotación de recursos naturales o no. De esta manera, en virtud de esta norma, podemos afirmar con seguridad que el Estado está obligado a fomentar el desarrollo sostenible en todos los aspectos posibles. Con esto, resulta evidente que nuestra Constitución se coloca dentro de las normas que reconocen al derecho ambiental la función de buscar el desarrollo sostenible, y no solo la “protección del ambiente”, como podría afirmarse de forma incompleta (Esteve, 2006).

Desarrollando más el concepto de medio ambiente reconocido en nuestro ordenamiento, la doctrina ha señalado, sobre la base de la interpretación realizada por el Tribunal Constitucional, que el medio ambiente que el ordenamiento jurídico protege, y por ende, el bien jurídico protegido sobre el cual recae el menoscabo que representa el daño ambiental, es el “*sistema medioambiental compuesto por elementos naturales y por los creados*”

por el ser humano, en equilibrio, para que la vida subsista adecuadamente ahora y en el futuro” (Rubio Correa et al., 2011).

Como consecuencia de esta interpretación, el medio ambiente protegido por el ordenamiento peruano englobaría todos los elementos que rodean al ser humano, incluyéndolo a él mismo y a los elementos producidos por el mismo (entendidos como elementos culturales). Todo este amasijo de elementos variados representa el bien jurídico protegido sobre el cual debe recaer el perjuicio que será considerado daño ambiental.

Sin embargo, es necesario profundizar un poco más en el concepto de medio ambiente necesario para definir el daño ambiental sobre el cual se debe construir la idea de nexo de causalidad. Esto se debe a que el concepto vigente en nuestro ordenamiento de medio ambiente es demasiado amplio, lo cual puede llegar a incorporar dentro del esquema de responsabilidad ambiental muchos supuestos que no califican propiamente como afectaciones al ambiente.

Partiendo de la idea de que el medio ambiente involucra la sostenibilidad de la vida en una calidad propicia, el cual ha sido reconocido en el fundamento 36 de la sentencia recaída en el *Exp. N° 0048-2004-PI* (2005), desde una perspectiva antropocéntrica, debemos afirmar que el medio ambiente que se protege jurídicamente es más que nada el equilibrio ecológico de todos sus elementos, el cual hace propicia las condiciones que rodean al ser humano para su desarrollo. Así, ya no quedarán fuera del concepto de medio ambiente elementos que, aun cuando no representan un beneficio directo para la especie humana, si aportan indirectamente a su beneficio porque propician la continuidad de la vida en general (Ruda Gonzales, 2008).

Entendiendo así el concepto de medio ambiente dentro de nuestro ordenamiento, es fácil entender la idea de daño ambiental sobre el cual se construye la teoría de la relación causal que exponemos en el presente trabajo. Como consecuencia de todo lo expuesto, se concluye en que el daño ambiental es la afectación del equilibrio existente del medio ambiente, siendo una afectación que debe tener la capacidad de exceder la capacidad de resiliencia que posee todos los cuerpos receptores naturales, exigiéndose una gradualidad especial para su calificación (Ruda Gonzales, 2008).

3.2. Características de la afectación

3.2.1. Carácter perjudicial

Después de haber analizado la naturaleza del bien jurídico afectado por el perjuicio denominado daño ambiental, en este numeral vamos a analizar otro aspecto fundamental para la comprensión de la noción jurídica de daño ambiental. Este es las características especiales que una afectación debe tener para ser considerada como daño ambiental.

El problema en este punto, tal y como sucede con la determinación del objeto afectado por el daño ambiental, es la complicación que se presenta para determinar cuándo se está afectando efectivamente el ambiente y cuando no. Esto se debe que, contrario a lo que sucede con los daños más comunes para el derecho, como las afectaciones consecuencia de ilícitos penales, no es fácil identificar un daño ambiental porque no es fácil definir cuándo se afecta el ambiente, como bien tutelado y administrado por el Estado.

La primera complicación en el análisis se presenta cuando advertimos que el medio ambiente no es protegido de manera absoluta, a diferencia de otros bienes jurídicos cuyo perjuicio nunca es tolerado por el derecho, como la vida, por ejemplo. Esto se debe a que no todos los impactos ambientales generados por el hombre están prohibidos, además de que dentro de los impactos que no están prohibidos podemos encontrar supuestos que no calzan dentro del concepto de daño ambiental. Es por esta razón que la diferenciación entre los impactos negativos que califican como daño ambiental y los que son excluidos de este concepto se complica por los supuestos poco claros que se dan en la práctica.

Para aclarar este punto, debemos partir de la idea de que toda actividad humana causa un impacto al medio ambiente siempre. Como consecuencia de esto, no todo impacto ambiental debe ser calificado como daño ambiental, porque esto traería como consecuencia que se prohibiera el desarrollo de las actividades del ser humano.

Ahora bien, la constitución obliga a la administración a proteger el medio ambiente, en la medida que su protección es indispensable para el desarrollo adecuado de los seres humanos en un nivel de salud aceptable. Como consecuencia de esto, hay impactos que necesariamente deben ser proscritos por el derecho, pues su tolerancia es peligrosa para la vida.

Para poder maximizar ambas obligaciones, el derecho requiere de un concepto bisagra que articule ambas finalidades para poder cumplirlas en las máximas proporciones posibles. Es así que el concepto de daño ambiental surge como respuesta a esta necesidad, para lograr la conciliación entre la protección del medio ambiente y el fomento del avance tecnológico e industrial.

Sin embargo, es necesario tener en cuenta siempre que no es posible delimitar en abstracto que es y que no es daño ambiental, sino que se requiere siempre un análisis pormenorizado de cada caso concreto para evaluar si un supuesto tiene el grado de afectación necesario. Esto se sustenta en que toda acción puede tener consecuencias variadas en el medio ambiente, a partir de las circunstancias especiales de cada caso.

Sobre el particular, Albert Ruda señala que si bien el daño ecológico puro, para ser resarcible, debe ser perjudicial para el medio ambiente, pueden existir dudas sobre cuándo se cumple esta condición. En algunos casos tal vez no sea posible encontrar un consenso social al respecto, mientras que, en otros, dicho consenso puede conducir a resultados ecológicamente indeseables (Ruda Gonzales, 2008). Asimismo, Andrés Briceño advierte también esta dificultad cuando señala que es complicado definir este tipo de afectaciones debido a las dificultades valorativas de cada caso.

La única regla que puede extraerse del análisis de la naturaleza del daño son los supuestos que generan riesgos para el ambiente, sin que esta signifique la existencia de daño ambiental en un caso concreto.

3.2.2. Magnitud del impacto

La magnitud de un impacto ambiental es exigible para evitar que cualquier impacto sea considerado daño ambiental. Así se excluyen del concepto los impactos negativos que no una representatividad para activar la represión del derecho como daño, sino solo como riesgo ilícito.

Ahora bien, el impacto analizado debe recaer en uno o más de los componentes ambientales o en la relación de equilibrio (equilibrio ecosistémico) que existe entre ellos. El impacto debe ser representativo, en el sentido de que debe tener la magnitud suficiente para alterar el equilibrio entre estos elementos o para inutilizar uno de ellos (piénsese en la destrucción de una laguna, por ejemplo) (Esteve, 2006). Cuando se comprueba el carácter

perjudicial de tal impacto es cuando se debe decidir si este tiene la magnitud suficiente para poder atribuir responsabilidad respecto al mismo. Por lo general, la alteración del equilibrio entre elementos ambientales puede calificarse como daño ambiental.

Siguiendo la línea argumentativa de Ruda Gonzáles, la gravedad se fija mediante el establecimiento de un margen infranqueable definido por la ley, el cual diferencia lo tolerable de lo intolerable en materia ambiental. Esta intolerabilidad se justifica y motiva en diversos criterios, entre los cuales puede identificarse el económico, a través de la evaluación del cese de servicios ecosistémicos, u otras consideraciones que el legislador impone a través de su razonamiento (Ruda Gonzales, 2008).

Como si estuviera siguiendo lo establecido por el profesor español, nuestro ordenamiento jurídico regula en los artículos 31° y 32° de la LGA los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y Límites Máximos Permisibles (LMP), que son parámetros de contenido químico de cuerpos receptores y de efluentes y emisiones respectivamente que son ese umbral de riesgo que marca lo tolerado y lo no tolerado por el derecho en lo que respecta a las actividades humanas y su impacto respecto al medio ambiente.

Ahora bien, los impactos ambientales ubicados fuera del margen de la tolerabilidad ambiental pueden no representar una consecuencia nociva importante para el ambiente. En esa línea, después de realizarse una indagación probatoria científica particular, tales impactos pueden ser calificados como situaciones de puro riesgo, dado que no provocan las consecuencias jurídicas del régimen de responsabilidad de daño ambiental que están reservadas a aquellas que alcanzan la magnitud estudiada en este apartado.

Si bien el riesgo no tolerado es también una afectación ambiental contraria a derecho que amerita la imposición de consecuencias jurídicas dentro de los diversos sistemas de responsabilidad que puede existir en nuestro ordenamiento jurídico, sin ser calificado como daño ambiental.

Por otro lado, el riesgo tolerado es un tipo de afectación que no llega a tener el mismo efecto nocivo ni la misma magnitud del daño ambiental, pues este solo consiste en exceder los parámetros preestablecidos por la ley respecto a la tolerabilidad de ciertas actividades dañosas. Como hemos señalado anteriormente, estos parámetros son disposiciones generales y, como tales, no son suficientes para determinar cuándo una afectación es daño ambiental.

En consecuencia, exceder estos parámetros no implica la comisión de un daño ambiental, sin embargo, es un impacto ambiental que por el peligro que representa para el medio ambiente puede y debe merecer una consecuencia jurídica que resulte disuasiva, sin perder de vista que es una figura distinta al daño ambiental: riesgo ambiental. Por esta razón, reiteramos, la ruptura del equilibrio ambiental que evidencia la existencia de verdadero daño ambiental debe ser verificada en cada caso concreto, mediante estudios técnicos.

Por ejemplo, en el continente asiático, el nuevo sistema chino muestra que los siguientes aspectos en comparación con el sistema anterior del Código Civil:

- 1) los agravios que dan lugar a daños se amplían de la contaminación ambiental a la contaminación ambiental y el daño ecológico;
- 2) el daño que debe compensarse, de los daños causados por la contaminación ambiental a los daños causados por la contaminación ambiental y el daño ecológico; y
- 3) al establecer la disposición de relleno de lagunas, establece una forma de conectar los daños de interés público con los recursos de derecho público.
- 4) Establece la base del derecho de reclamación para los litigios de interés público ambiental. Sin embargo, todavía hay los siguientes defectos que necesitan ser mejorados:

1) El Código Civil chino hereda la Ley de Responsabilidad Civil Extracontractual y todavía adopta la responsabilidad por negligencia por agravios ambientales, que no requiere ilegalidad. Esto es contradictorio con algunas disposiciones del Derecho Administrativo. Esto ha llevado a discrepancias en la práctica judicial debido a las diferentes leyes aplicables. Este problema, que existía antes del Código Civil, no se ha resuelto bien después del Código Civil. En este sentido, este documento cree que cada productor puede afectar los intereses de otros cuando realiza una producción normal. Adoptar la teoría de la no ilegalidad inevitablemente hará que el productor sea responsable del daño a otros si el productor se dedica a la producción. No es útil para el desarrollo social y económico. Por lo tanto, es necesario buscar un equilibrio entre la justicia y el utilitarismo, recurrir a la teoría del límite de tolerancia, comparar la naturaleza y gravedad del daño sufrido por la

víctima con la evaluación social del acto cometido por el infractor, el estado de establecimiento de las instalaciones de prevención de daños y el cumplimiento legal. Al mismo tiempo, determinar el límite de tolerancia del daño de forma individual y específica, teniendo en cuenta las condiciones circundantes de la ubicación del infractor, e imponer responsabilidad por daños y perjuicios solo si se excede el límite de tolerancia. La infracción ambiental se investigará solo por los daños que excedan el límite de tolerancia. En cuanto a si se excede o no el estándar nacional de emisión de contaminación, no es adecuado como criterio para la ilegalidad de la responsabilidad civil por daños, sino más bien como criterio para determinar si el acto contaminante debe ser sancionado o no por el Derecho Administrativo.

2) El código civil chino ha creado un sistema de daños punitivos para el agravio ambiental, pero ¿en qué medida debe ser la compensación por el castigo del infractor ambiental? No existe un estándar uniforme. Este documento cree que el sistema de compensación en el Código Civil es de reparación en lugar de castigar. Si se puede determinar la cantidad de daño sufrido por la víctima, el infractor ambiental debe pagar los daños. No hay necesidad de aplicar daños punitivos en este caso. Si no se puede determinar el monto del daño sufrido por la parte perjudicada, existe la posibilidad de aplicar daños punitivos. Incluso si se aplica la disposición de daños punitivos, el monto de la pena debe juzgarse de acuerdo con el daño perdido medido por el juez en cada caso. Esto es para permitir que los llamados daños punitivos sigan cumpliendo esencialmente una función de relleno y para mantener la integridad y consistencia de la función de relleno del sistema de derecho civil. El castigo real se cede al derecho público (Xu & Khan, 2023).

CAPITULO V

LA RELACIÓN DE CAUSALIDAD

La relación de causalidad dentro de un esquema de responsabilidad legal, ya sea civil, penal o administrativa, se puede definir como la relación lógica de causa y efecto existente entre dos hechos que tienen consecuencias jurídicas, la cual puede identificarse por la aplicación de las máximas de la experiencia. Así, por ejemplo, en el caso de un transeúnte atropellado, las lesiones que sufrió la persona atropellada son consecuencia del golpe del vehículo al momento de la colisión, siendo evidente una relación causa y efecto, la cual podemos identificar por el conocimiento que tenemos de las consecuencias que trae para el cuerpo humano el impacto con un vehículo motorizado que se desplaza a cierta velocidad. Es mediante este ejercicio simple que podemos definir e identificar a que nos referimos a relación de causalidad, la cual, reiteramos, es un elemento fundamental para la atribución de todo tipo de responsabilidad.

Dotando de un mayor contenido jurídico a esta definición, la doctrina civilista nacional, que es la que ha dado mayor desarrollo al tema de causalidad como elemento de responsabilidad en nuestro medio, señala que esta relación lógica de causa y efecto es la que posibilita que una determinada víctima pueda exigir a otra persona, es decir, al causante del daño, el resarcimiento que corresponde de acuerdo a ley. En ese sentido, Fernando de Trazegnies señala lo siguiente:

Tiene que haber una razón para que una determinada persona y no otra sea obligada a pagar; una razón que individualice un presunto responsable dentro del universo de personas.

El primer hecho que utiliza el Derecho para estos efectos es la relación de causa a efecto; independientemente de que, una vez establecida ésta, el Derecho exija todavía otros elementos más para convertir al causante en efectivamente responsable (culpa, por ejemplo, en los casos de responsabilidad subjetiva) (de Trazegnies Granda, 2001).

Bajo esta definición, podemos observar que la relación de causalidad es así un elemento fundamental para la atribución de responsabilidad en el derecho, la cual se identifica con la relación de causa efecto entre dos eventos, en principio. Decimos en principio, porque como bien señala el autor en esta cita, después de la comprobación de los elementos dentro de un esquema de responsabilidad puede observarse que tal relación desaparezca o no tenga la significancia original para el derecho. Siguiendo tal línea argumentativa, el mismo autor señala también lo siguiente, para reflexionar en torno a la relación causal real y la relación causal para el derecho:

Por eso, la pregunta causal consiste siempre en “¿quién hizo qué?”; pero este “hacer” no debe ser entendido en sentido físico sino jurídico; es decir, el “hacer” del Derecho es el acto que el mismo Derecho señala como causa de otro.

Es probable que muchas veces la norma legal no diga nada especial sobre la causa. En estas condiciones debe entenderse que está asumiendo la causa natural como causa jurídica. Pero, en otros casos, la norma establece, directamente o implícitamente, una causa diferente. (de Trazegnies Granda, 2001).

Como veremos más adelante, esta característica de la relación de causalidad y la diferencia sustancial que existe entre la causa natural y la causa jurídica resulta de especial importancia para la atribución de responsabilidad por daño ambiental, pues su apreciación en los hechos y en el derecho generan complicaciones propias de este esquema de responsabilidad especial.

Respecto a la regulación específica del procedimiento administrativo sancionador existente en nuestro ordenamiento, que es el esquema de responsabilidad al que se ha adscrito la responsabilidad por daño ambiental en nuestro país (aunque con ciertas ambigüedades, el capítulo 2 del Título IV de la *Ley N° 28611 - Ley General del Ambiente, 2005*), que regula la responsabilidad de daño ambiental, establece este régimen de responsabilidad como un tipo de responsabilidad administrativa especial regulada por esta norma y por las que desarrollan sus disposiciones), el numeral 8

del artículo 230° de la Ley N° 27444 (*Ley del Procedimiento Administrativo General*, 2001), Ley del Procedimiento Administrativo General, regula el denominado principio de causalidad, que no es otra cosa que la aplicación de la definición de relación de causalidad dentro de la atribución de responsabilidad administrativa y su reconocimiento como elemento fundamental de la misma. Esta norma señala lo siguiente:

Artículo 230°.- Principios de la potestad sancionadora administrativa

La potestad sancionadora de todas las entidades está regida adicionalmente por los siguientes principios especiales:

(...)

8. Causalidad. - *La responsabilidad debe recaer en quien realiza la conducta omisiva o activa constitutiva de infracción sancionable.*

Siguiendo la línea del análisis realizado por De Trazegnies en las líneas anteriores, este artículo reconoce que la relación de causalidad que debe identificarse para la atribución de responsabilidad administrativa de manera general en el ordenamiento peruano es la relación causal natural. En otras palabras, por aplicación del inciso 8 del artículo 230° de la Ley N° 27444, el responsable administrativo será aquel sujeto que haya incurrido materialmente en la infracción tipificada como regla general, sin perjuicio de los supuestos en los que se tenga que aplicar una regla distinta (tal es el caso de los supuestos de responsables múltiples u otros supuestos regulados en las normas administrativas especiales, supuestos que exceden los extremos del análisis de la relación de causalidad que aquí se plantea).

Interpretando la aplicación de este principio, que se traduce en la relación de causal exigible en sede administrativa, Juan Carlos Morón Urbina señala lo siguiente:

Tratándose de una acción positiva del administrado, resulta más o menos sencillo determinar la existencia de la relación de causalidad entre ambos, pues basta simplemente hacer una reconstrucción mental de los hechos y ponderar si el perjuicio o hecho típico se hubiere producido igualmente con la sola acción del administrado. El supuesto más complejo es la determinación de si una omisión satisface la exigencia de causalidad para hacer aplicable la sanción. Para el efecto, es necesario calificar si la omisión realmente es causal

del tipo previsto para la sanción, respondiendo a la pregunta ¿si se hubiese realizado la acción omitida con todas las condiciones relevantes del entorno, no se hubiese realizado el estado de cosas perjudiciales? (Morón, 2007).

Una de las razones prácticas por las que el análisis de la aplicación del nexo causal para la responsabilidad ambiental en el Perú se identifica en gran medida con el análisis de causalidad dentro de la responsabilidad administrativa es que el daño ambiental recae siempre en el causante directo del daño, como regla general. Esto es reconocido así, por aplicación de los principios especiales de atribución de responsabilidad que están regulados en el Título Preliminar de la Ley N° 28611, Ley General del Ambiente. En este título se encuentran los artículos VIII y IX, que regulan los principios de internalización de costos y de responsabilidad ambiental respectivamente, de la siguiente manera:

Artículo VIII.- Del principio de internalización de costos

Toda persona natural o jurídica, pública o privada, debe asumir el costo de los riesgos o daños que genere sobre el ambiente.

El costo de las acciones de prevención, vigilancia, restauración, rehabilitación, reparación y la eventual compensación, relacionadas con la protección del ambiente y de sus componentes de los impactos negativos de las actividades humanas debe ser asumido por los causantes de dichos impactos.

Artículo IX.- Del principio de responsabilidad ambiental

El causante de la degradación del ambiente y de sus componentes, sea una persona natural o jurídica, pública o privada, está obligado a adoptar inexcusablemente las medidas para su restauración, rehabilitación o reparación según corresponda o, cuando lo anterior no fuera posible, a compensar en términos ambientales los daños generados, sin perjuicio de otras responsabilidades administrativas, civiles o penales a que hubiera lugar.

El principio de internalización de costos establece que los costos de prevención, remediación y/o compensación del daño ambiental deben ser asumidos por el sujeto causante del mismo.

De otro lado, el principio de responsabilidad ambiental establece que el causante del daño ambiental, entendido como el causante directo del perjuicio, está obligado a estas medidas. Así, ambas normas regulan dos

caras de la misma moneda, en la medida que la primera se refiere fundamentalmente a los costos que se deben asumir como consecuencia del daño o riesgo ambiental, mientras que el segundo incide directamente en lo que se refiere a la responsabilidad del causante directo.

Como puede observarse, palabras más, palabras menos, la caracterización de ambos principios dentro de la ley es la traducción del principio general de causalidad aplicado a la regulación ambiental. En específico, dado que la Ley General del Ambiente es la que regula el régimen general aplicable a los daños ambientales, ambos principios funcionan como cláusulas normativas generales que permiten imputar la responsabilidad por daño ambiental al causante directo.

1. Teorías sobre su aplicación

Como hemos señalado ya, el análisis de la relación de causalidad frente a la comisión de un daño ambiental, como sucede con cualquier daño, es un análisis de índole fáctica. Esto quiere decir que se debe analizar cuáles fueron los hechos que intervinieron en la cadena de consecuencias que finalizó en el daño ambiental. Luego de esto, se deben individualizar las causas que han tenido relevancia frente para la comisión del daño, lo cual nos permitirá identificar cual es la que permitirá trasladar el costo de la reparación o compensación del daño ambiental producido.

En nuestro derecho, la individualización de las causas para la atribución de responsabilidad se realiza mediante la determinación de la causa adecuada, que tendría reconocimiento en nuestro derecho a partir del artículo 1985 del Código Civil, el cual señala lo siguiente:

Artículo 1985°.- *La indemnización comprende las consecuencias que deriven de la acción u omisión generadora del daño, incluyendo el lucro cesante, el daño a la persona y el daño moral, debiendo existir una **relación de causalidad adecuada** entre el hecho y el daño producido.*

El monto de la indemnización devenga intereses legales desde la fecha en que se produjo el daño.

Esta teoría reconocida expresamente por nuestro Código Civil es definida por Fernando de Trazegnies, quien indica que “frente a un daño se trata de saber cuál es la causa, dentro de la universalidad de causas que

encarna cada situación, que conduce usualmente al resultado dañino.” (de Trazegnies Granda, 2001). En la línea del autor, sobre la base de las máximas de experiencia, es posible determinar cuál de entre todas las causas es la que permite atribuir responsabilidad a un sujeto.

Es importante resaltar que la aplicación de la regla de la experiencia debe hacerse de manera abstracta y no de manera concreta, es decir, que debe ser evaluada de manera general, sin tener en cuenta las particularidades que pueda presentar el individuo presuntamente responsable respecto al daño causado. Esto se debe a que un análisis contemplando las particularidades del caso puede prestar a confusión entre el análisis de causalidad y el análisis del criterio de imputación a aplicarse, que es un paso posterior dentro del análisis de responsabilidad. Así lo señala el propio Fernando De Trazegnies, cuando señala lo siguiente:

*No se trata de establecer negligentes. Todo lo que se está planteando es la **delimitación de la causa** como presupuesto de la responsabilidad.*

*Pero, como antes se ha dicho, no todo causante es responsable. **La responsabilidad se determinará en un segundo paso**, una vez establecida la relación causal, mediante el análisis de los factores de atribución: culpa o riesgo.*

Ahora bien, en materia ambiental, la aplicación de la regla de la causalidad adecuada deviene en una complicación debido a la complejidad que se presenta respecto al daño ambiental. Es debido a esto que cierto sector de la doctrina afirma que debe crearse un régimen particular para este tipo de daños, de manera que no se le aplique esta regla típica del derecho civil, lo cual ha sido criticado por Jorge Mosset, quien señala:

Sin perjuicio de reconocer las dificultades en la aplicación del régimen general, de admitir los “desvíos” del cuadro dogmático, el apartamiento de los paradigmas clásicos, creemos que nuestra materia, el Derecho de Daños, ha dado ya –antes de ahora- pruebas acabadas en su maleabilidad, de su aptitud para adaptarse a circunstancias diferentes y, de este modo, dar la respuesta adecuada a los “hechos nuevos”, productos de los “tiempos nuevos” (Martínez-Calcerrada y Gómez, 2013)

Al margen de concordar o discrepar con la postura asumida por este autor - lo cierto es que en la doctrina y en la legislación comparada existen numerosas teorías novedosas –y otras no tanto- que buscan dar solu-

ción a este problema complejo. Tan es así que en algunas legislaciones se admite hoy en día la “presunción de causalidad” para ciertos supuestos de daño ambiental. Como ejemplos, Jorge Mosset nos brinda dos legislaciones que es oportuno mencionar:

La presunción de causalidad reconoce en el panorama comparado dos interesantes aplicaciones:

- *La de la ley alemana Unwelthg, que prevé con carácter general una presunción de responsabilidad para una serie de supuestos, mejorando la posición de la víctima, facilitando la prueba del presupuesto*

(...)

- *La de la ley japonesa, conocida como de Compensación de Daños a la Salud, relacionados con la contaminación, de 1973 (Martínez-Calcerrada y Gómez, 2013).*

En una forma similar, el inciso 1 del artículo 3° de la Ley 26/2007 Ley de Responsabilidad Medioambiental española, (Gobierno de España, 2007), establece una presunción de causalidad sobre los daños que pudieran ser ocasionados por actividades enlistadas como peligrosas en la propia ley. Esta norma señala lo siguiente:

Artículo 3°. Ámbito de aplicación.

1. Esta ley se aplicará a los daños medioambientales y a las amenazas inminentes de que tales daños ocurran, cuando hayan sido causados por las actividades económicas o profesionales enumeradas en el anexo III, aunque no exista dolo, culpa o negligencia.

Se presumirá, salvo prueba en contrario, que una actividad económica o profesional de las enumeradas en el anexo III ha causado el daño o la amenaza inminente de que dicho daño se produzca cuando, atendiendo a su naturaleza intrínseca o a la forma en que se ha desarrollado, sea apropiada para causarlo (De un modo análogo, la teoría estadounidense de participación en el mercado: del market share, según la cual el demandante no tiene que probar el nexo causal si los demandados son fabricantes de un determinado producto dañoso, a partir de un mismo diseño o fórmula, o han desarrollado una misma práctica fabril; el demandante no puede identificar, ni se puede exigir que lo haga, al productor, concreto causan-

te del daño, y los productores demandados tienen una cuota relevante del mercado del producto en cuestión. Estas teorías se equiparán en su estructura con la llamada responsabilidad colectiva en nuestra doctrina)

De esta manera, el legislador español y por añadidura, el legislador europeo, dado que esta ley es la trasposición al ordenamiento español de la *Directiva - 2004/35 - ES - EUR (2004)* - han buscado reforzar el régimen de responsabilidad ambiental objetivo aplicable a los daños ambientales, mediante la presunción iuris tantum de causalidad, colocando la carga de la prueba sobre el presunto dañador.

Todas estas referencias normativas demuestran que la relación de causalidad dentro del esquema de responsabilidad para el daño ambiental tiene particularidades que han motivado normas que se apartan de la tradicional regla aplicable a los daños comunes. Pero este problema no ha sido únicamente motivo de innovación normativa, sino que también ha motivado los esfuerzos de la doctrina hacia nuevas reglas.

Así lo ha puesto en evidencia Néstor Cafferatta, quien hace una revisión de las teorías presentes en la doctrina, la cual nos permitimos citar:

1. ***Teoría holandesa de la causa alternativa o disyunta:*** *industrywideor Enterprise theory of liability, que exime al demandante de probar el nexo causal cuando, dado el elevado número de posibles sujetos agentes, resulta materialmente imposible para la víctima probar quién fue exactamente el que produjo el daño cuya reparación va a ser reclamada. En este caso, se hace solidariamente responsable a todos los posibles sujetos agentes demandados, con lo que se refuerza considerablemente la protección de la víctima.*
2. ***Teoría alemana de la condición peligrosa:*** *la que predica si la acción u omisión crea un peligro capaz de provocar el suceso dañoso, tal acción u omisión puede considerarse como causa eficiente del daño efectivamente ocurrido, según una valoración ex post. Es similar a la teoría de responsabilidad por la contribución en los riesgos, adoptada por la jurisprudencia estadounidense, en cuya virtud se le permite a la víctima accionar contra uno de los fabricantes y éste deberá solventar la indemnización por haber producido el producto que originó el daño, aunque no se sepa si el producto consumido era suyo o no, por lo que se beneficia a la víctima pues puede elegir el más solvente.*

3. **Teoría de la proporcionalidad:** sostiene que la reparación debe ser proporcional a la probabilidad de causación del daño. Esta teoría, que parece haber encontrado eco en la doctrina estadounidense, establece que, si en un caso determinado hay, por ejemplo, un 30% de probabilidad de que el demandado haya originado el daño cuyo resarcimiento solicita el demandante, este deberá recibir de aquel un 30% del total del daño sufrido. Las críticas a esta teoría coinciden básicamente con uno de los principios más importantes de la responsabilidad civil: la justa reparación de la víctima.
4. **Teoría de la “víctima más probable”:** de la persona “más víctima” (*mostlikelyvictim*). De acuerdo con esta teoría, en los supuestos en que hay varias personas que alegan haber sufrido un daño, se debe resarcir a aquellos que prueben una mayor probabilidad de causalidad entre el daño sufrido y la actividad del demandado. Las críticas a esta teoría concluyen en que la determinación del nexo causal no puede imputarse exclusivamente con criterios científicos, sin haber probado jurídicamente la existencia de la relación de causalidad (Cafferatta, 2009).

Más allá de las posibles críticas respecto a estas teorías respecto a la determinación de la causa que permitirá atribuir responsabilidad por daño ambiental, el basamento de estas y las posibilidades que abren respecto a las soluciones del problema causal en materia ambiental justifica su análisis y aplicación respecto a la regulación peruana, para apuntar hacia una posible modificación normativa.

2. Aplicación en el derecho administrativo

Dentro del derecho administrativo, la relación de causalidad es un elemento necesario para la atribución de responsabilidad administrativa. Este principio se traduce, como ya hemos visto en su definición general, en la exigencia de comprobar en cada caso la existencia de una relación causa efecto entre la infracción cometida y la acción realizada por el sujeto imputado.

Además del contenido general del principio de causalidad, en el caso particular del derecho administrativo sancionador, el contenido de este principio se relaciona al denominado principio de culpabilidad, conforme lo señala Morón Urbina:

En este sentido, este principio conecta con otro bastante debatido en el Derecho Administrativo sancionador: el de culpabilidad del infractor. A falta de norma, en nuestro derecho ha sido introducido jurisprudencialmente por el Tribunal Constitucional como una exigencia para ejercer legítimamente la potestad sancionadora.

En efecto, nuestro Tribunal ha establecido “(...) Por lo que hace al primer motivo, es decir, que la sanción se justifique (...) es lícito que el Tribunal se pregunte si es que en un Estado constitucional de derecho válido que una persona sea sancionada por un acto ilícito cuya realización se imputa a un tercero (Morón, 2007).

Visto así, el principio de culpabilidad dispone que la responsabilidad administrativa solo recaiga sobre el sujeto que cometió la infracción, como un corolario de la exigencia de que toda persona solo deba responder ante la ley por los actos propios. En ese sentido señala Nieto García lo siguiente:

...garantiza que únicamente puede exigirse responsabilidad “por los hechos propios” y en ningún caso por los “hechos de otro”. Procedente también del Derecho Penal, su recepción en el Derecho Administrativo Sancionador está avalada por una copiosa jurisprudencia del Tribunal Constitucional (Sentencia 219/1988, de 22 de noviembre., 1988) (Sentencia 245/1991, 16 de diciembre, 1991), canonizada en la Sentencia 146/1994 de 12 de mayo, (1994), en la que se declara que “entre los principios informadores del orden penal se encuentra el principio de personalidad de la pena, protegido por el artículo 25.1 de la Norma fundamental, también formulado por este Tribunal como principio de personalidad de la pena o sanción [...] denominación suficientemente reveladora de su aplicación en el ámbito del Derecho Administrativo Sancionador” (Martínez, 2022).

Es importante resaltar que el principio de culpabilidad, como señala la doctrina, es un principio de naturaleza compleja pues contiene diversos subprincipios aplicables a la potestad sancionadora de la administración pública. Sobre el particular, concordamos con Gómez Tomillo y Sanz Rubiales cuando señalan lo siguiente:

Entendemos que el principio de culpabilidad debe ser entendido como un principio complejo que engloba, a su vez, varios principios. Como indica Mir Puig, pueden incluirse diversos límites del iuspuniendi que

tienen en común exigir como presupuesto de la pena (o en nuestro caso de la sanción administrativa) que puede “culpase” a quien la sufra por el hecho que la motiva.

En definitiva, todos ellos se apoyan en la idea de dignidad humana, al tiempo que tratan de proporcionar seguridad jurídica (Cruzado, 2018).

Las características esbozadas sobre la interpretación y aplicación del principio de causalidad en sede administrativa revisten especial importancia para el estudio del vínculo de causalidad en la atribución de responsabilidad ambiental. Como hemos visto, uno de los contenidos del principio de causalidad consiste en la atribución de responsabilidad por los hechos propios, que consiste en responsabilizar al imputado únicamente por las infracciones producidas por acción directa.

Por otro lado, el principio contaminador-pagador en materia ambiental establece que aquel que realiza una actividad que genera impactos ambientales negativos debe internalizar los costos de prevención (ex ante) y control (ex post) de tales impactos. La finalidad de este principio consiste en hacer que estos costos sean incorporados dentro de la estructura de producción del sujeto que provocó los impactos ambientales (Águila, 2023).

Ahora bien, sobre la base de estos conceptos, la exigencia de nexo de causalidad tiene trascendencia en materia ambiental, pues la aplicación de este principio de manera conjunta al principio contaminador pagador trae consigo la exigencia de internalizar los costos de prevención y reparación del daño ambiental para el causante del mismo.

Para tales efectos, tanto para la declaración de responsabilidad administrativa por la comisión de daño ambiental, como para la declaración de obligaciones de reparación o compensación se debe comprobar la existencia de causalidad, tanto por ser una exigencia propia del derecho administrativo sancionador, como para la atribución de responsabilidad por daño ambiental.

4. Particularidades en el derecho ambiental

Al igual que el principio contaminador pagador, las características propias de la regulación ambiental y del bien jurídico protegido que estas disposiciones buscan proteger tienen impacto sobre el contenido del principio de causalidad, perfilándolo para su aplicación en la atribución de responsabilidad por daño ambiental. Sobre este punto en particular, José Esteve Pardo señala lo siguiente:

La confluencia de estos dos aspectos o vectores –la determinación científica y la determinación en un proceso judicial de unos hechos– genera, en las acciones de responsabilidad por daños ambientales, una problemática propia.

Con frecuencia se trata de casos revestidos de una complejidad técnica o científica muy densa que se hace muy difícil de dilucidar o resolver en el marco de un proceso judicial desarrollado según sus pautas más tradicionales.

Más concretamente, el sujeto al que se le atribuye la caga de la prueba puede enfrentarse ante una especialización y complejidad técnica que le rebasa por completo (Esteve, 2006).

Debido a las particularidades identificadas por Esteve Pardo, resulta que un aspecto que adquiere particularidades y que provoca otras más para la atribución de responsabilidad ambiental es el de la prueba para la determinación del nexo de causalidad dentro del procedimiento administrativo sancionador en nuestro ordenamiento. Esto se debe a que la prueba que se requiere para su comprobación es de carácter netamente técnica, lo cual amerita, a su vez, una actividad prospectiva por parte de la administración particular.

Es así que Blanca Lozano señala que el principio de causalidad, al igual que todos los principios propios del derecho administrativo sancionador, sufre una serie de modulaciones que deben ser tenidas en cuenta para su estudio. En ese sentido, señala lo siguiente:

La modulación fundamental del principio de culpabilidad en el ámbito sancionador administrativo consiste en una relativización del componente subjetivo a la hora de producirse la infracción, de tal forma que las infracciones resultan imputables al titular o responsable de la actividad a título de simple negligencia, por la falta de adopción de todas las precauciones necesarias para evitar la comisión, por sí o por quienes se hallen bajo su vigilancia, de la conducta infractora, bastando normalmente para presumir tal negligencia con la prueba de la concurrencia de los hechos sancionables y de la inexistencia de una causa de justificación (como pueden serlo, además del error de hecho invencible al que nos hemos referido, la confianza legítima derivada de una actuación de la Administración que permita generar en el sujeto la convicción de estar actuando lícitamente, o el hecho de que el obligado haya actuado amparándose en una interpretación razonable de la norma, previsión esta última contemplada expresamente por la LGT). (Lozano, 2022)

El Estado, como facultativo del *ius puniendi*, otorga poder tanto al Derecho penal como al Derecho administrativo sancionador, pero este poder no es ilimitado y debe regirse por una serie de principios. Si bien el Derecho administrativo sancionador ha tomado principios del Derecho penal para desarrollarse, esto no significa que estos principios se hayan transferido directamente, ya que ambos sectores funcionan de manera diferente. Por lo tanto, el Derecho administrativo sancionador debe contar con principios que se adecuen a sus propios fines. El objeto del principio de culpabilidad es sancionador, para mantener el funcionamiento de la sociedad regulada administrativamente, estableciendo garantías para ejercer el orden y la seguridad necesarios para el mantenimiento del interés público. El análisis de sentencias muestra cómo operan los sistemas de control jurisdiccionales, demostrando actividad verificadora y sancionadora. También se han encontrado sentencias que validan el principio de inocencia, por falta de pruebas. En el Derecho sancionador, aplica la presunción de inocencia, lo que implica que corresponde al administrado demostrar su inocencia frente a las afirmaciones dolosas y/o de la administración.

- Los delitos ambientales tipificados en el título XIII del libro Segundo del Código Penal son tipos penales en blanco porque remiten a las normas administrativas. Es decir, la conducta antijurídica del agente va estar determinada por su incumplimiento en sede administrativa; por ello se requiere de un sistema normativo ambiental unificado, también son tipos penales de peligro ya que la conducta del agente puede causar un riesgo potencial al medio ambiente o causar el riesgo ambiental verificable.
- El proceso penal seguido en los delitos ambientales también son un tipo penal en blanco porque el fiscal exige del informe técnico legal elaborado por la autoridad ambiental quien luego de un análisis legal sobre el ilícito administrativo, entregará al fiscal; sin embargo, no es claro si este informe es determinante para la formulación de acusación fiscal.
- Las FEMA (fiscalías especializadas en materia ambiental) han sido recientemente creadas, se espera que los profesionales que lo conforman posean un alto nivel de especialización en Derecho Ambiental y compromiso ético ambiental, siendo necesario para la efectividad de su rol como titular de la acción penal contra los delitos ambientales tipificados en el título XIII

Tratándose de daños ambientales ocasionados por actividades que encontrándose obligadas a ser imputadas, respecto de la responsabilidad por daño ambiental, la única consecuencia jurídica que dicho incumplimiento presenta se verificaría en las declaraciones, precisando que fuesen verídicas. Los autores precedentes manifiestan que el delito se ratifica al que lo cometió, mas no al que supuestamente lo realizó. Muy por el contrario

Para el caso de los daños ambientales ocasionados por actividades que encontrándose obligadas a ingresar al SEIA sí lo hicieron, para analizar como operarán los factores subjetivos de imputación de la responsabilidad por daño ambiental se deberá distinguir si se trata de daños autorizados en la evaluación; no autorizados en ella; o, finalmente, no considerados en la misma. Tratándose de este último caso, habrá que diferenciar nuevamente según se trate de daños previsibles o imprevisibles.

Las consecuencias jurídicas de mayor trascendencia que se producirán en cada uno de los casos anteriores, dicen relación con la posibilidad de aplicar la presunción de responsabilidad contenida en el inciso 2° del artículo 52 de las LGBMA; así como la posibilidad de hacer responsable de la reparación de los daños al Estado.

En sintonía con lo expuesto precedentemente, la interpretación de las normas de la LBGMA a la luz del principios del Derecho ambiental, permite concluir que la Autoridad pública es responsable, solidariamente con el causante del daño, en aquellas hipótesis en que este es un tercero que obra mediante una autorización administrativa, particularmente, cuando estemos frente a hipótesis de daños ambientales que no fueron previstos pero que sí eran previsibles (responsabilidad por la actuación del tercero autorizado).

Dicha responsabilidad deberá perseguirse contra la Administración a través del régimen establecido en la LBGMA y no sobre la base del estatuto propio que rige la responsabilidad patrimonial del Estado, precisamente por no tratarse de una hipótesis de responsabilidad patrimonial y por aplicación del principio de especialidad.

CAPÍTULO VI

CUANTIFICACIÓN DEL DAÑO AMBIENTAL

Recurrimos al Principio 22 de la Declaración de Estocolmo (Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano, 1972), donde se refiere a la responsabilidad y compensación por el daño ambiental a nivel internacional cuando explícitamente establece que:

“los Estados deben cooperar para continuar desarrollando el derecho internacional en lo que se refiere a la responsabilidad y a la indemnización a las víctimas de la contaminación y otros daños ambientales que las actividades realizadas dentro de la jurisdicción o bajo el control de tales Estados causen en zonas situadas fuera de su jurisdicción” (Castañón del Valle, 2006).

También el maestro Vázquez García (Mosqueira Céspedes, 2022), menciona que el daño ambiental posee una serie de características específicas:

- Es irreversible
- Es acumulable
- Es difuso, tanto por la forma de exteriorizarse como por la forma en que se determina la relación causa-efecto
- Es colectivo, pues puede presentar una pluralidad de autores, de víctimas o de ambos
- Es consecuencia de los procesos tecnológicos
- Carece de espacialidad determinada
- Se presenta en dos ámbitos al afectar los derechos subjetivos de individuos determinados y el interés común de la sociedad.

Empezaremos explicando la cuantificación del daño ambiental utilizando la tecnología, generado en la invasión de Kuwait por fuerzas iraquíes en agosto de 1990, estudiado por Hassan Al Sharrah (2007), el cual

afectó al ambiente de la región del Golfo y de Kuwait; las consecuencias ambientales de las operaciones militares y la quema de pozos petrolíferos en 1991 afectaron gravemente al aire y al medio marino, además, de los ecosistemas terrestres de Kuwait.

Durante las crisis, el aire recibió diariamente cientos de miles de toneladas de hollín de petróleo, óxidos de carbono y óxidos de azufre. Los ecosistemas marinos y costeros se vieron gravemente afectados por el derrame y drenaje de petróleo en las aguas del Golfo. Los ecosistemas terrestres de Kuwait se vieron gravemente afectados por el drenaje de petróleo que formó redes de ríos y lagos petroleros, además, se vio afectado por el hollín del petróleo y por las operaciones militares del lugar; esto dio lugar a la penetración y solidificación del petróleo con los sedimentos superficiales que condujo a la formación de una nueva capa superficial conocida como ‘Tarcrete’.

Con el apoyo de la tecnología en la actualidad, se utilizaron datos LANDSAT-TM (165/40), utilizando ERDAS Imagine S/W, con múltiples fechas para detectar y cuantificar los daños ambientales ocurridos a la invasión iraquí entre 1990 y 1991, se procedió a aplicar la técnica de detección de cambios en las imágenes de componentes principales (PC) de diciembre de 1990 y noviembre de 1991.

Posteriormente se llegaron a la conclusión que el ambiente en Kuwait ha sufrido graves daños ambientales, resultado del desastre de la segunda guerra del Golfo, estos daños ambientales fueron detectados en 5240 km², emitieron los siguientes resultados:

- **Los daños ambientales severos** y elevados representan el **18,7%** (conforman la nueva capa de ‘Tarcrete’ y ríos y lagos petroleros en forma de penacho negro)
- **Los daños ambientales moderados** representan el **18,8%**, en forma de hollín de petróleo pesado.
- **Los daños ambientales leves** representan el **30,2%**, en forma de hollín de petróleo de baja densidad.

Otra experiencia significativa en cuanto a ponderar el daño ambiental se presenta Wyoming, realizado por The World Air Quality Index (2024), que intentaron cuantificar los costos de daño ambiental asociados con el

polvo de las carreteras sin pavimentar, se encontró que el polvo asociado con los caminos no pavimentados es responsable de **daños ambientales por un valor de \$2429/milla/año**. La mayor parte de este costo está relacionado con cambios en el rendimiento anual de los cultivos (68%) y la salud humana (38%).

El costo total estimado del daño ambiental en Wyoming es de \$32 millones al año. Este valor equivale al 0,08% del Producto Interno Bruto (PIB) total y al 4,7% del valor agregado bruto del sector agrícola en el estado. Además, estos impactos representan el 0.1% del total de ingresos personales en el estado.

Una comparación del costo del ciclo de vida mostró que el mantenimiento de carreteras sin pavimentar utilizando supresores químicos es un 48% más barato que los métodos de mantenimiento tradicionales, considerando la vida útil y los impactos ambientales. Este análisis puede usarse como base para evaluaciones de costo - beneficio en el proceso de gestión.

El costo ambiental se cuantifica con la pérdida, degradación o agotamiento de los recursos naturales, esto puede incluir la pérdida de biodiversidad, degradación del suelo, contaminación del agua y aire, entre otros (Ivette, 2021). El costo para la mitigación y remediación de las pérdidas degradación, incluye los costos asociados con la limpieza y restauración del medio ambiente afectado; por ejemplo, limpiar un derrame de petróleo o restaurar un ecosistema degradado (SINIA, 2023). El costo de Prevención: Invertir en tecnologías y prácticas que prevengan el daño ambiental antes de que ocurra, que puede incluir la implementación de tecnologías limpias y prácticas sostenibles. Costo Social, el impacto que se genera en la salud pública, la disminución de la calidad de vida y otros efectos sociales que pueden derivarse del daño ambiental. El costo económico, que incluye la pérdida de ingresos debido a la degradación ambiental, como la disminución de la productividad agrícola o la pérdida de turismo.

Como ejemplo, en intentos por resarcir los daños ambientales, se realizó una reforestación en Copper Basin. Este lugar se encuentra en Polk County, Tennessee, Estados Unidos. También conocido como Ducktown Basin, es una región geológica que contiene depósitos de cobre. La zona cubre aproximadamente 60,000 acres (24,000 hectáreas). Fue una labor

que tomo su tiempo debido a la severa erosión, la escasez de nutrientes y humedad del suelo y los fuertes vientos. Esta región, una vez rica en bosques, había sufrido una pérdida significativa de cobertura arbórea debido a actividades como la minería, la tala ilegal y los incendios forestales. El método utilizado fue la plantación de especies autóctonas (se seleccionaron especies nativas que estaban adaptadas al clima y al suelo local). Se usó de tecnologías innovadoras, como la implementaron técnicas como la siembra de bolitas reforestadoras que contienen semillas, nitrógeno, arcilla y compost (Llanos, 2024); además de la colaboración comunitaria, se trabajó en estrecha colaboración con las comunidades locales para asegurar la sostenibilidad y el éxito a largo plazo del proyecto

Los recientes esfuerzos de reforestación han empleado especies tanto de pino como de madera dura ((Flores et al., 2019). La erosión del suelo ha seguido a la destrucción de los ecosistemas forestales circundantes. Las precipitaciones se han vuelto altamente ácidas, comúnmente con un pH inferior a 3,0 a principios de la década de 1970. Se han registrado concentraciones elevadas de níquel y cobre en los suelos a distancias de 50 kilómetros (31 millas). Los sedimentos erosionados, contaminados con trazas de metales, han contaminado los lagos y los recursos hídricos de la zona. Esta contaminación, junto con la acidificación de las aguas superficiales, ha provocado la extirpación de numerosas especies acuáticas (Flores et al., 2019).

El valor económico de un bosque virgen puede ser bastante alto debido a los múltiples beneficios ecológicos y económicos que proporciona. Estos beneficios incluyen:

- La captura de carbono
- Biodiversidad
- Regulación hídrica
- Fertilización de suelos
- Servicios recreativos, entre otros.

Se estima que el valor económico de la biodiversidad de los bosques es de entre 166,000 y 490,000 millones de dólares por año. Esto es aproximadamente cinco veces más alto que los costos de conservación a escala global (Maderero, 2017).

Esto significa que la biodiversidad contenida en los bosques, no solo tiene un valor intrínseco, sino también un valor económico masivo. Los bosques son bancos naturales, repletos de “capital biológico” que nos proporciona aire limpio, agua purificada, suelos fértiles y mucho más. Imaginemos cuánto más podríamos obtener si invirtiéramos adecuadamente en su conservación. El hecho de que el valor económico de la biodiversidad supere tanto los costos de conservación nos dicen que proteger nuestros bosques no es solo una cuestión ambiental, sino una inversión con grandes rendimientos para nuestro bienestar y economía.

La problemática de la valoración de los daños al medio ambiente, es deficiente en doctrinales legales claras, jurisprudenciales y científicas en torno a este tema crucial en el derecho ambiental. La importancia de desarrollar un sistema integral para valorar el daño ambiental con el fin de garantizar un sistema efectivo de responsabilidad y compensación. El profesor Manuel Castañón del Valle (Ripka de Almeida et al. 2018) menciona varios métodos utilizados para la valoración económica del daño ambiental, tales como el:

1. Método del precio de mercado

Consiste en estimar el valor del daño ambiental a partir del precio que se le asigna en los mercados comerciales. Este enfoque es útil cuando el bien ambiental afectado tiene un valor de mercado conocido, como la madera de un bosque o los peces de un río. Sin embargo, su principal limitación es que no siempre el precio de mercado refleja el valor real del bien ambiental, especialmente cuando se trata de servicios ecosistémicos sin un precio estable.

2. Método de reemplazo o sustitución

Este método estima el valor del daño calculado en el costo necesario para restaurar o reemplazar el bien dañado. Por ejemplo, si un cuerpo de agua se contamina, el valor del daño puede estimarse según el costo de instalar una planta de tratamiento para eliminar los contaminantes. Es útil para daños tangibles y fácilmente cuantificables, pero puede ser problemático cuando la restauración completa no es posible.

3. Método del precio hedónico

Utiliza el impacto de los bienes ambientales en los precios de bienes comerciales para evaluar el daño. Utilizada para valorar bienes ambientales indirectamente, calcula, el cómo las características ambientales influyen en los precios de otros bienes en el mercado. Planea calcular

a ciertos atributos ambientales como afectan el valor económico de los bienes que se compran y venden, como viviendas o terrenos. El método analiza las diferencias en los precios de bienes que se ven afectados por la calidad del entorno o por características ambientales específicas.

4. Método de costo de viaje

Evalúa el valor de un bien ambiental basándose en los gastos que las personas incurren para disfrutarlo. Por ejemplo, el costo del transporte, alojamiento y otros gastos relacionados con la visita a un parque natural. Este método es útil para valorar sitios recreativos, pero no captura completamente el valor intrínseco del ecosistema o los beneficios no relacionados con su uso recreativo.

5. Método de transferencia de beneficios

Se basa en la transferencia de estimaciones de valor realizadas en estudios previos en otras áreas. Si se ha estimado el valor de un bosque en una región, esa estimación puede aplicarse a un bosque similar en otro lugar. Sin embargo, esto puede ser problemático si las características de los sitios difieren significativamente, lo que podría llevar a estimaciones inexactas.

6. Método de valoración contingente

Implica realizar encuestas a la población para determinar cuánto estarían dispuestos a pagar por preservar o restaurar un bien ambiental. Este enfoque captura tanto el valor de uso como el de no uso de los bienes ambientales, pero puede estar sesgado debido a las respuestas hipotéticas de los encuestados, que no siempre reflejan sus preferencias reales.

7. Método de productividad

Valora el daño ambiental calculando el impacto sobre la productividad de los bienes o servicios que dependen del recurso natural afectado. Por ejemplo, se podría estimar la disminución en la producción de cultivos debido a la degradación del suelo. Este enfoque es útil cuando hay una relación directa entre la calidad ambiental y la productividad económica.

Castañón también discute la falta de consenso y la ausencia de normas específicas que guían la valoración del daño ambiental, lo cual deja la cuestión al juicio de los tribunales, generando incertidumbre y resultados inconsistentes. Por tanto, enfatiza la necesidad urgente de establecer un marco normativo sólido y consensuado para la valoración, que sea adaptable a las características particulares de cada caso y garantice una reparación adecuada del daño ambiental.

Mantener intactos estos ecosistemas es, sin duda, una de las decisiones más inteligentes y rentables que podemos hacer para las generaciones futuras.

1. Potencial ambiental de un bosque peruano

La valoración del potencial económico de los bienes y servicios en los ecosistemas de boscosos es crucial para entender su importancia y para tomar decisiones informadas que promuevan su conservación y uso sostenible. Conocer esta particularidad, nos proporciona una base sólida para argumentar a favor de la protección de estos ecosistemas vitales frente a amenazas como la deforestación y el cambio climático.

Por ejemplo, los bosques inundables y de altura de la amazonia peruana tienen características únicas y proporcionan numerosos servicios ecosistémicos. Estos servicios ecosistémicos incluyen la regulación del clima, el ciclo del agua, la conservación de la biodiversidad, y servicios culturales y recreativos.

La valoración económica es un método utilizado para estimar el valor económico de estos servicios, como la valoración contingente, el análisis costo-beneficio, y la disposición a pagar. Esto sirve para la toma de decisiones, que puedan influir en las políticas y en la gestión sostenible de los bosques (*Valorización económica del bosque inundable.pdf*, 2009).

La valoración económica de los bienes y servicios ambientales puede ayudar a promover la sostenibilidad de los bosques. La inferencia profunda es asignar un valor monetario a los servicios ecosistémicos, se pueda incentivar su conservación y manejo sostenible. Sin embargo, esta premisa depende de la capacidad de los métodos de valoración para capturar adecuadamente el valor intrínseco y no mercantil de los recursos naturales, lo cual es un desafío significativo en la economía ambiental. Existe actualmente una combinación de métodos de valoración, como la directa (como los precios de mercado) y la indirecta (como la valoración circunstancial) para abordar la complejidad de los ecosistemas. La deducción, es que un enfoque mixto puede proporcionar una estimación más completa del valor total de los servicios ambientales. Sin embargo, la efectividad de esta combinación dependerá de la calidad y validez de los datos, como los beneficios futuros de la captura de carbono o la conservación de la biodiversidad.

La consecuencia inferior es que los responsables de la formulación de políticas sean capaces de utilizar estos valores para justificar la asignación de recursos y la implementación de prácticas sostenibles. No obstante, se debe consi-

derar que la política pública no siempre se guía por criterios económicos, y los valores económicos estimados pueden no ser suficientes para generar un cambio de comportamiento sin un respaldo normativo o incentivos económicos.

La dificultad de estimar económicamente los valores de no uso (como el valor de legado y el valor de existencia), ya que estos no están asociados directamente con transacciones en el mercado. La consecuencia es que los métodos actuales no son insuficientes para capturar valores de manera precisa, lo que podría subestimar el valor real de los ecosistemas. Esta limitación es crítica porque sugiere que las decisiones basadas en estos métodos podrían llevar a una gestión inadecuada de los recursos, al no reflejar completamente los beneficios sociales y ambientales. Podríamos considerar la adaptación de estos métodos para otros ecosistemas con características similares.

El sector de Chambira, está ubicado en el distrito de Saposoa, provincia del Huallaga, departamento de San Martín – Perú, se encuentra a una altitud aproximada de 850 metros sobre el nivel del mar. La selva tropical es un ecosistema predominante, con una gran diversidad de especies de plantas, árboles, arbustos y hierbas. La hojarasca y el mantillo son componentes importantes del suelo, contribuyendo al ciclo del carbono. Los suelos son generalmente fértiles y ricos en materia orgánica debido a la constante descomposición de la vegetación. El sector está atravesado por varios ríos y arroyos que forman parte de la cuenca del río Amazonas. Estos cuerpos de agua son vitales para la biodiversidad y el suministro de agua. La región alberga una gran variedad de fauna, incluyendo especies de aves, mamíferos, reptiles y anfibios. La interacción entre estos organismos y su entorno es crucial para mantener el equilibrio ecológico. Sin embargo, pueden ser propensos a deslizamientos en áreas con pendiente (Sánchez Fernández & Herrera Tufino, 1998) Saposoa (14-j). Sus principales características son:

Climatológicas

- Presenta un clima tropical, cálido y húmedo, con una temperatura promedio que varía entre 24°C y 26°C.
- Humedad elevada durante todo el año, producto de la evapotranspiración
- La precipitación anual es alta, con una media de 2,000 a 2,500 mm.

Principales especies forestales

- Cedro (*Cedrela odorata*)
- Caoba (*Swietenia macrophylla*)
- Copaiba (*Copaifera langsdorffii*)
- Cinchona (*Cinchona officinalis*)

Fauna

- Monos aulladores (*Alouatta sp.*)
- Felinos como el jaguar (*Panthera onca*)
- Delfines rosados (*Inia geoffrensis*)
- Aves como el loro (*Amazona sp.*)

Flora

- Heliconias (*Heliconia sp.*)
- Orquídeas (*Orchidaceae*)
- Helechos arborescentes (*Cyathea sp.*)
- Palmas (*Arecaceae*)

1.1. Potencial de carbono

Los bosques tropicales almacenan grandes cantidades de carbono. No obstante, al cortar árboles (y en ocasiones quemarlos después), el carbono que estaba almacenado es liberado en la atmósfera, lo que empeora la situación del cambio climático a nivel mundial. La amazonia es el bosque tropical más extenso del planeta, y Perú representa la segunda extensión más grande, situada justo al lado oeste de Brasil (el más extenso). Los bosques peruanos se distinguen por poseer una determinación detallada del carbono superficial que se remonta a 2013 (Perú. Ministerio del Ambiente & Carnegie Institution for Science, 2014).

Las densidades de carbono varían significativamente entre las regiones de selva baja, selva alta accesible y selva alta de difícil acceso, la selva baja muestra que en estos ecosistemas existen mayores niveles de carbono por hectárea. Estas diferencias son fundamentales para identificar zonas prioritarias en la mitigación del cambio climático y esfuerzos de conservación. Además, la importancia de utilizar datos de campo específicos para mejorar la precisión de las estimaciones es imprescindible. Sin embargo, se existen vacíos en cuanto a la información con datos reales, particularmente en las regiones de Costa y Sierra, debido a la disponibilidad limitada de información. Es fundamental incluir otros reservorios de carbono, como el suelo y la necromasa, en el futuro. Las estimaciones de captura de carbono en las regiones del Perú (*Estimación de los contenidos de carbono de la biomasa aérea en los bosques de Perú*, 2014), se manifiestan de la siguiente manera:

- Selva Baja: 116,74 tC/ha (toneladas de carbono por hectárea).
- Selva Alta Accesible: 84,54 tC/ha (toneladas de carbono por hectárea).

- Selva Alta de Difícil Acceso: 98,06 tC/ha (toneladas de carbono por hectárea).
- Costa: Contenido de carbono: 8,37 tC/ha (toneladas de carbono por hectárea).
- Sierra: Contenido de carbono: 31,34 tC/ha (toneladas de carbono por hectárea).

La selva baja tiene la mayor capacidad de captura de carbono por hectárea, esto se debe a la densa vegetación y la gran cantidad de árboles altos que almacenan grandes cantidades de carbono en su biomasa aérea. La selva alta accesible tiene una capacidad de captura de carbono significativa, aunque menor que la selva baja, puede deberse a la mayor accesibilidad y, por lo tanto, a la posible intervención humana que reduce la densidad forestal. La selva alta de difícil acceso tiene una mayor capacidad de captura de carbono que la selva alta accesible, probablemente debido a la menor intervención humana y la conservación de su vegetación densa y biodiversa. La región costa tiene la menor capacidad de captura de carbono, posiblemente esto se debe a su vegetación escasa y la presencia de suelos áridos que no son adecuados para el crecimiento de árboles grandes y densos. La sierra tiene una capacidad intermedia de captura de carbono, las condiciones climáticas y la altitud afectan la densidad y el tipo de vegetación, lo que resulta en una menor capacidad de almacenamiento de carbono en comparación con las regiones amazónicas, pero mayor que la costa.

El enfoque inferencial sugiere que a medida que se amplíe la cobertura de datos y se incluyan otros reservorios, se espera reducir la incertidumbre en las estimaciones actuales. Además, se recomienda la continuidad en la mejora de metodologías y la generación de ecuaciones alométricas específicas para las ecozonas del país, lo cual es vital para alcanzar una representación más precisa y exhaustiva del carbono almacenado.

1.2. Pérdida de carbono almacenado en bosques

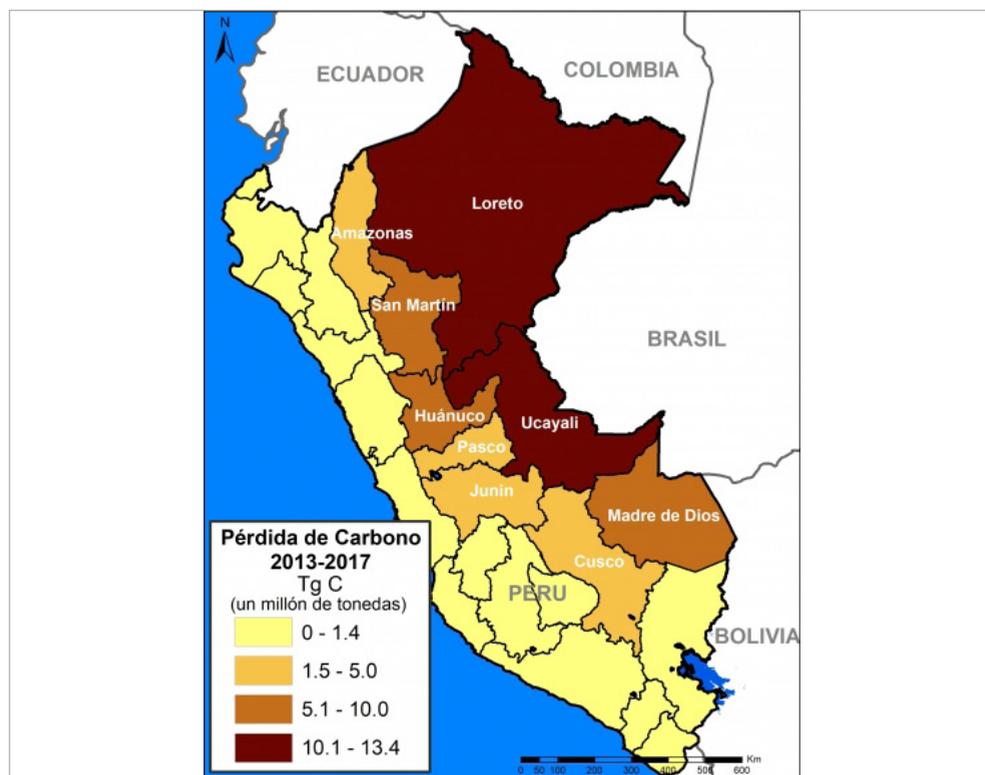
En cinco años, se ha liberado un total de 59.09 teragramos (59 millones de toneladas métricas) de carbono debido a la pérdida de bosques en la amazonia peruana. Se estima que la degradación podría representar hasta el 70% de las emisiones. Dado que la degradación no está completamente contabilizada, las cifras actuales de 59 millones de toneladas métricas

podrían ser significativamente menores que la realidad. Si la degradación representa el 70% de las emisiones (Monitoring of the Andean Amazon Project, 2018), el total podría acercarse a 200 millones de toneladas métricas. Las regiones de Loreto y Ucayali son las más afectadas (figura 13), lo que puede inferirse debido a su gran extensión de bosque y la presión de actividades humanas como la agricultura y la minería.

Es imperativo implementar políticas de conservación más robustas para proteger estos bosques. La amazonia peruana actúa como un importante sumidero de carbono y su destrucción podría tener efectos irreversibles en el equilibrio ecológico. Urgen acciones urgentes para detener la deforestación y degradación forestal, incluyendo la reforestación y la gestión sostenible de los recursos forestales.

Figura 13

Mapa del Perú, departamentos con pérdida de carbono 2013-2017

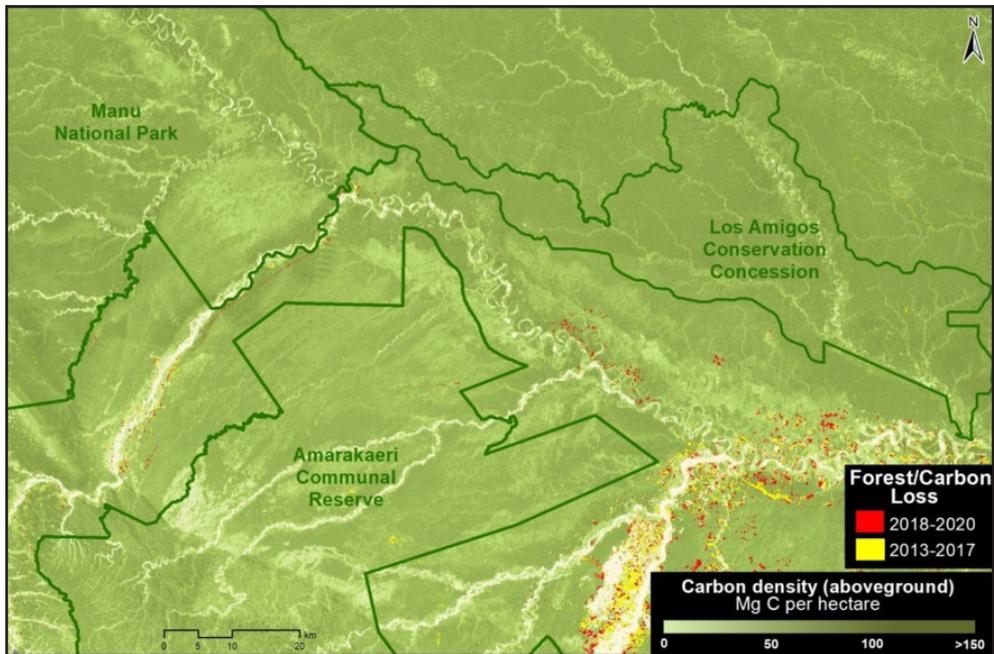


Fuente: Monitoring of the Andean Amazon Project (2018)

En la figura 14 se indica cómo un conjunto de áreas protegidas (Parque Nacional Manu y Reserva Comunal Amarakaeri) y la primera Concesión de Conservación del país (Los Amigos) están protegiendo de manera efectiva más de 210 millones de toneladas métricas de carbono en el sur de la Amazonía peruana.

Figura 14

Áreas protegidas (Parque Nacional Manu, Reserva Comunal Amarakaeri y Los Amigos)

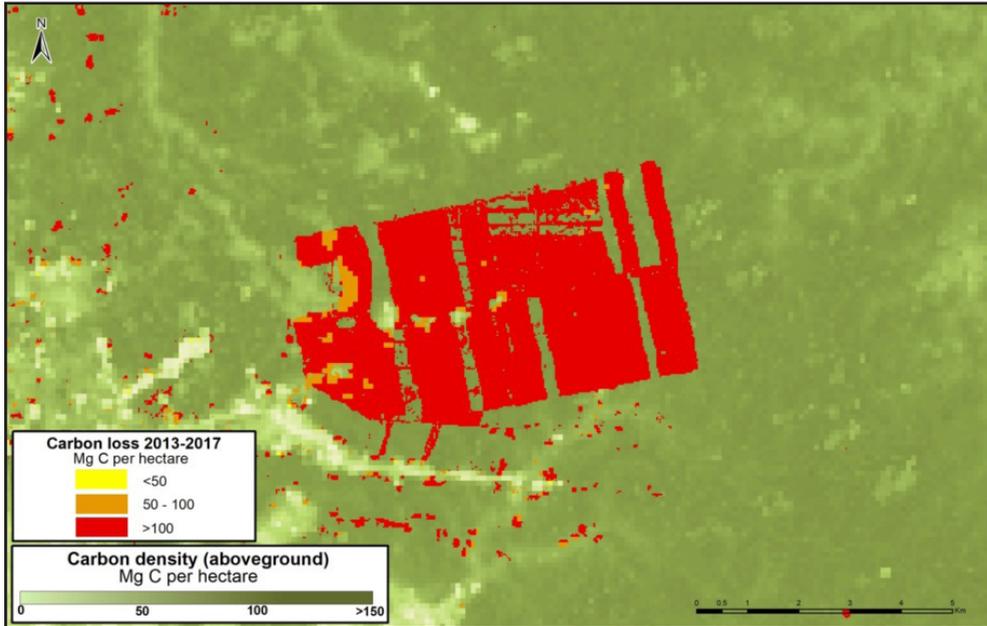


Fuente: Monitoring of the Andean Amazon Project (2021) when these forests are cleared (and often subsequently burned)

La protección del carbono previamente mencionada es equivalente a las emisiones de gases de efecto invernadero de 2.500 millones de vehículos de pasajeros circulando durante un año, o a las emisiones de CO₂ de casi 3.000 centrales eléctricas de carbón en un año, según US EPA (2015).

Figura 15

Áreas de proyecto de cacao a gran escala en la Amazonía peruana del norte (Loreto)

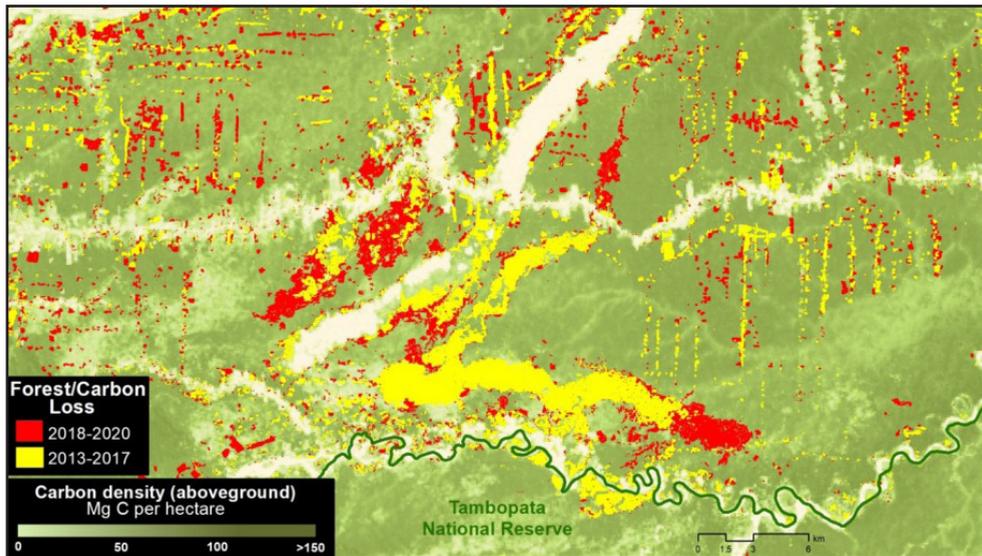


Fuente: Monitoring of the Andean Amazon Project (2021) when these forests are cleared (and often subsequently burned)

La figura 15 muestra que un proyecto de cacao a gran escala (Cacao) en una región al norte de la amazonía peruana, específicamente en el departamento de Loreto, las imágenes denotan una irreparable pérdida, de casi 300,000 toneladas métricas de carbono. Esto representa un impacto ambiental considerable. Esta pérdida de carbono, que se encontraba previamente almacenada en la vegetación y el suelo de la región, tiene consecuencias graves para el cambio climático, ya que al ser liberado a la atmósfera contribuye al aumento de los gases de efecto invernadero, incrementando la liberación de carbono equivalente en toneladas métricas, implica una mayor cantidad de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera, un gas con un alto potencial de calentamiento global.

Figura 16

Áreas de minería (oro) en la región Madre de Dios.



Fuente: Monitoring of the Andean Amazon Project (2021) when these forests are cleared (and often subsequently burned)

Se tiene la certeza de la pérdida de más de 800.000 toneladas métricas de carbono (Monitoring of the Andean Amazon Project, 2021) when these forests are cleared (and often subsequently burned (figura 16) como resultado de la extracción de oro en el sur de la Amazonía peruana, específicamente en la región de Madre de Dios. Esto refleja un impacto ambiental severo y directamente asociado a la actividad minera. Este fenómeno no solo agrava el cambio climático, sino que también desencadena una serie de efectos devastadores en el ecosistema local. La extracción de oro y/o otros metales en la región, caracterizada mayormente por operaciones artesanales e ilegales, ha conducido a una deforestación extensa ya la alteración significativa de los suelos y cuerpos de agua. La minería de oro en Madre de Dios conlleva la eliminación completa de la cobertura forestal para acceder a los depósitos de oro. Esto implica la tala y quema de grandes extensiones de bosque, lo que libera el carbono previamente almacenado en la biomasa. El cambio en el uso del suelo resulta en la pérdida irreparable de áreas que, de otra forma, actuarían como sumideros de carbono. La transformación del paisaje, además, reduce la capacidad del área para regenerarse naturalmente, limitando la posibilidad de que el bosque recupere su función ecológica.

La cantidad de carbono perdido que se mencionó antes, es equivalente a las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por casi 80 millones de automóviles de pasajeros circulando durante un año, o a las emisiones de dióxido de carbono de 92 plantas de energía a base de carbón en un año.

Las emisiones de los gases de efecto invernadero se representan por la cantidad del gas en cuestión (como 1 tonelada de metano), una cantidad equivalente de dióxido de carbono (como 28 toneladas de CO₂ equivalente) o en términos de carbono (como 7,63 toneladas de carbono). El carbono frecuentemente se emplea como medida estándar para monitorear las emisiones a lo largo del ciclo del carbono. Para transformar una cantidad de carbono en una cantidad igual de dióxido de carbono, se multiplica por 3,67 (US EPA, 2015).

Por ejemplo, en una hectárea de bosque virgen, en el sector Chambira, Saposoa, las fuentes de carbón se encuentran almacenadas de la siguiente manera (Ordóñez-Sánchez, Luis; Ordóñez-Ruiz, Karina, 2021):

- Hierbas: 0,27 t de carbón (0,43%)
- Hojarasca: 1,8 t de carbón (2,84%)
- Mantillo: 6,3 t de carbón (9,93%)
- Raíces del suelo: 0,56 t de carbón (0,88%)
- Arbustos: 1,33 t de carbón (2,10%)
- Árboles: 53 t de carbón de carbón (83,62%)

Figura 17

Distribución de carbono en un bosque



Esto significa que, la suma total del carbono almacenado es 63.26 toneladas por hectárea. Los árboles son los mayores reservorios de carbono en este ecosistema, representando aproximadamente el 83.8% del total de carbono almacenado. Su destrucción tendría un impacto significativo en la pérdida de carbono.

Si todos los árboles en la hectárea fueran talados o quemados, se liberarían 53 toneladas de carbono a la atmósfera. Ahora, si se destruye la hojarasca, hierbas, arbustos y raíces también liberaría 10.26 toneladas adicionales de carbono.

Asimismo, la devastación de una hectárea de bosque en el sector Cham-bira, Saposoa, resultaría en la liberación de 63.26 toneladas de carbono a la atmósfera, contribuyendo así significativamente al cambio climático. La conservación de estos bosques es crucial para mantener estos importantes sumideros de carbono y preservar la sostenibilidad del ecosistema.

La liberación de 63.26 toneladas de carbono almacenados en una hectárea de bosque virgen a la atmósfera significaría, serían 232 toneladas métricas de dióxido de carbono (CO₂) equivalente a (US EPA, 2015):

1. Equivalente a emisiones GEI procedentes de:

Tabla 1

Emisiones de gases de efecto invernadero de diversas procedencias

Toneladas métricas de CO₂	Equivale a emisión de GEI	Unidad de medida	Descripción	Procedencia
	55.2	Nº	Vehículos de pasajeros propulsados por gasolina conducidos durante un año	
232.1642				
	954720.7972	kilómetros	Recorridos por un vehículo de pasajeros promedio impulsado por gasolina	

2. Equivalente a las emisiones de CO₂ liberadas a la atmósfera:**Tabla 2***Emisiones de CO₂ de diversas procedencias*

Toneladas métricas de CO ₂	Equivale a emisiones CO ₂	Unidad de medida	Descripción	Procedencia
	98,799.248	Litros	Gasolina consumidos	
	86,250.6075	Litros	Diesel consumidos	
	115,951.818	Kilogramos	Carbón quemado	
	3.1	N°	Camiones cisterna llenos de gasolina	
	30.2	N°	Hogares consumiendo energía durante un año	
	45.8	N°	Hogares consumiendo electricidad durante un año	
232.1642	1.3	N°	Vagones de tren que utilizan carbón quemado para su funcionamiento	
	8,5376.2	Litros	Petróleo consumido	
	10,656	N°	Cilindros de gas propano para cocina utilizados en un año	
	0.0001	N°	Centrales eléctricas de carbón funcionando, en un año	
	0.0006	N°	Centrales eléctricas con gas natural funcionando en un año	
	15,312,790	N°	Teléfonos inteligentes cargados durante un año	

A partir de estas equivalencias, podemos deducir que la quema de combustibles fósiles, tanto en vehículos como en centrales eléctricas, contribuye significativamente a las emisiones de CO₂. Por ejemplo, el consumo de gasolina y diésel, sumado al uso de carbón, genera una cantidad considerable de emisiones que podrían ser comparables a las de cientos de hogares. Esto demuestra la urgente necesidad de transitar hacia fuentes de energía más sostenibles.

En un estudio sobre la emisión de CO₂ por fuentes móviles, se estimó que el sector del transporte es responsable de aproximadamente el 23% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero a nivel mundial. Asimismo, el IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático) ha resaltado que la quema de combustibles fósiles es la principal fuente de emisiones de gases de efecto invernadero. La Agencia Internacional de Energía (AIE) subraya que la transición a energías renovables podría reducir significativamente las emisiones (ONU Turismo, 2020). La importancia de reducir la dependencia de combustibles fósiles. La adopción de tecnologías y prácticas sostenibles no solo es esencial para mitigar el cambio climático, sino también para mejorar la calidad del aire y la salud pública.

La protección de 63.26 toneladas de carbono almacenada en una hectárea La protección de 63.26 toneladas de carbono almacenada en una hectárea de bosque virgen no emitidas a la atmósfera significaría, 232 toneladas métricas de dióxido de carbono (CO₂) almacenado, lo que equivale a (US EPA, 2015):

3. Emisiones de gases de efecto invernadero evitadas mediante:

Tabla 3

Emisiones de gases de efecto invernadero no emitidas a la atmósfera

Toneladas métricas de CO ₂	Equivale a GEI no emitidas a la atmósfera	Unidad de medida	Descripción	Procedencia
232.1642	80,500	Kilogramos	Kilogramos de residuos reciclados adecuadamente, en lugar de ser depositados en vertederos	
	11.5	Nº	Camiones de basura que reciclan residuos en lugar de depositarlos en vertederos	

10,075	N°	Bolsas de basura con residuos reciclados, en lugar de ser dispuestos en vertederos	
0.061	N°	Estaciones de energía limpia funcionando durante un año	

4. Equivalencia del carbono almacenado por:

Tabla 4
Carbono almacenado

Toneladas métricas de CO ₂	Equivale a carbón almacenado	Unidad de medida	Descripción	Procedencia
	3,835	N°	Plantas de árboles sembradas y cultivadas durante 10 años	
232.1642	1.0967	Kilómetros cuadrados	Bosques en un año	
	0.00607028	Kilómetros cuadrados	Bosques preservados de la conversión de tierras de cultivo en un año	

La protección de 63.26 toneladas de carbono en una hectárea de bosque equivale a 232 toneladas métricas de dióxido de carbono (CO₂) almacenado. Esto es significativo porque los bosques actúan como sumideros de carbono, absorbiendo CO₂ de la atmósfera y almacenándolo en la biomasa y el suelo (tabla 3 y 4).

Según el Viceministerio de Desarrollo Estratégico de los Recursos Naturales, la deforestación y degradación de los bosques representan casi el 20% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (GEI). En Perú, la deforestación representa el 47% del total de emisiones de GEI. Iniciativas como REDD y REDD+ buscan reducir estas emisiones mediante la conservación y manejo sostenible de los bosques (MINAM, 2024a).

El proyecto Conservación del Bosque de Protección Alto Mayo, ha logrado reducir la tasa de deforestación en un 30% y ha verificado la reducción de 2.8 millones de toneladas de CO₂ en el área del proyecto. Esto demuestra el impacto positivo de la conservación de bosques en la mitigación del cambio climático (MINAM, 2024b). Por otro lado, el informe MAAP #148: Pérdida y Protección de Carbono en la Amazonía Peruana, estima que las áreas protegidas y las tierras indígenas han salvaguardado 3.2 billones de toneladas de carbono en la Amazonía peruana entre 2013 y 2021. Esto es un ejemplo de cómo la protección de bosques puede tener un impacto significativo en la reducción de emisiones de CO₂ (Monitoring of the Andean Amazon Project, 2021) when these forests are cleared (and often subsequently burned).

1.3. Costo del carbono almacenado

Para entender mas a profundidad, necesitamos definir ciertos aspectos.

Valor del Carbono: Se refiere al valor monetario asignado a una tonelada de emisiones de CO₂. Este valor puede ser determinado por diferentes métodos, como el costo de mitigación, el costo de adaptación, o el valor de los daños sociales y ambientales causados por las emisiones de carbono.

Precio del Carbono: Es el costo que se impone a las emisiones de CO₂, generalmente a través de mecanismos como impuestos al carbono, sistemas de comercio de emisiones (ETS) o subsidios a tecnologías bajas en carbono. El precio del carbono busca internalizar los costos externos de las emisiones de carbono y proporcionar incentivos económicos para reducir las emisiones.

Costo del Carbono: Es el costo total asociado con la emisión de una tonelada de CO₂, incluyendo tanto los costos directos como los costos indirectos. Los costos directos pueden incluir los costos de mitigación y adaptación, mientras que los costos indirectos pueden incluir los daños a la salud, la agricultura, y los ecosistemas.

Criterio de estimación

Costo de mitigación: Este método calcula el costo de reducir las emisiones de CO₂ a través de tecnologías y prácticas más limpias. Incluye los costos de inversión en nuevas tecnologías, infraestructura y cambios en los procesos industriales.

Costo de adaptación: Este método calcula el costo de adaptarse a los efectos del cambio climático, como la construcción de infraestructuras resistentes a inundaciones, la mejora de la gestión del agua y la protección de áreas costeras.

Costo de daños sociales y ambientales: Este método calcula el valor monetario de los daños causados por las emisiones de CO₂, como la pérdida de biodiversidad, el deterioro de la salud humana y los impactos económicos de eventos climáticos extremos. Básicamente describe una metodología para la estimación del precio social del carbono en países de América Latina y el Caribe. Se enfoca en la inclusión del CSC en los procesos de evaluación de proyectos de inversión pública. Aunque proporciona un valor específico, subraya la importancia de un precio del carbono bien diseñado para reducir eficientemente las emisiones.

El costo social del carbono (CSC) se refiere al impacto económico que genera la emisión de una tonelada adicional de CO₂ sobre la economía, el bienestar social y los ecosistemas. Determinar este costo es vital para la creación de políticas públicas enfocadas en el cambio climático y el desarrollo sostenible en la región, los diversos estudios sobre el CSC para identificar patrones y reducir la incertidumbre en las políticas públicas. Este concepto, esencial en la economía del cambio climático, busca cuantificar el daño económico de emitir una tonelada adicional de CO₂ en un momento específico.

Para calcular el costo de la pérdida de 1 tonelada de carbono emitida a la atmósfera en nuestra moneda nacional, soles peruanos, primero necesitamos conocer el costo por tonelada de CO₂ en dólares estadounidenses (USD) y luego convertir esa cantidad a soles peruanos (PEN). Según el estudio de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), el costo social del carbono es aproximadamente 25.83 USD por tonelada de CO₂ (CEPAL United Nations, 2019).

En 63.26 toneladas de carbono liberados en una hectárea de bosque virgen, tenemos 232.1642 toneladas métricas de dióxido de carbono (CO₂).

El costo de una tonelada métrica de dióxido de carbono (CO₂) en soles peruanos y dólares estadounidenses varía según el contexto y el método de cálculo. Según un informe del Ministerio de Economía y Finanzas del Perú (MEF, 2020), el precio social del carbono es de 7.17 USD por tonelada de CO₂. Utilizando el tipo de cambio actual de 3.8 PEN por USD, podemos calcular el costo en soles peruanos.

Tabla 5*Costo de CO₂ en USD y PEN, según CEPAL United Nations (2019)*

Hectárea	Almacenamiento de carbón	Tonelada de carbón	Toneladas métricas CO ₂	Costo USD \$	Costo PEN S/.
1	Árbol	53	194.51	\$5,024.19	S/19,091.93
	Arbusto	1.33	4.8811	\$126.08	S/ 479.10
	Hierba	0.27	0.9909	\$25.59	S/ 97.26
	Hojarasca	1.8	6.606	\$170.63	S/ 648.41
	Mantillo	6.3	23.121	\$597.22	S/ 2,269.42
	Raíces	0.56	2.0552	\$53.09	S/ 201.73
Total		63.26	232.1642	\$5,996.80	S/ 22,787.84

Tabla 6*Costo de CO₂ en USD y PEN, según MEF (2020)*

Hectárea	Almacenamiento de carbón	Tonelada de carbón	Toneladas métricas CO ₂	Costo USD \$	Costo PEN S/.
1	Árbol	53	194.51	\$1,394.64	S/ 5,299.62
	Arbusto	1.33	4.8811	\$35.00	S/ 132.99
	Hierba	0.27	0.9909	\$7.10	S/ 27.00
	Hojarasca	1.8	6.606	\$47.37	S/ 179.99
	Mantillo	6.3	23.121	\$165.78	S/ 629.95
	Raíces	0.56	2.0552	\$14.74	S/ 56.00
Total		63.26	232.1642	\$1,664.62	S/ 6,325.55

La importancia de identificar el CSC como un mecanismo en la construcción de políticas públicas al cambio climático y el desarrollo sostenible es imprescindible. El informe de la CEPAL (United Nations, 2019) establece un costo social del carbono de \$25.83 USD por tonelada de CO₂, valor que es significativamente más alto que el precio social del carbono mencionado por el viceministro Quijandría, cuyo valor es de \$ 7.17 en una nota de prensa del MEF (2020).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Águila, D. A. C. (2023). El derecho fundamental a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado como un derecho imponderable. *Justicia Ambiental. Revista del Poder Judicial del Perú especializada en la Protección del Ambiente*, 3(3), Article 3. <https://doi.org/10.35292/justiciaambiental.v3i3.755>
- Alegre Ch., A. (2010). (s. f.). *Derecho al ambiente equilibrado y adecuado para el desarrollo*. Recuperado 28 de mayo de 2024, de <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-peruana-de-ciencias-aplicadas/legislacion-ambiental/2-derecho-al-ambiente-ada-alegre/53961081>
- Almeida, M. P. de, Gaylarde, C. C., Neto, J. A. B., Delgado, J. de F., Lima, L. da S., Neves, C. V., Pompermayer, L. L. de O., Vieira, K., & Fonseca, E. M. da. (2023). The prevalence of microplastics on the earth and resulting increased imbalances in biogeochemical cycling. *Water Emerging Contaminants & Nanoplastics*, 2(2), N/A-N/A. <https://doi.org/10.20517/wecn.2022.20>
- Andaluz Westreicher, C. (2006). *Manual de Derecho Ambiental*. Scribd. <https://es.scribd.com/doc/133251957/Manual-de-Derecho-Ambiental-Carlos-Andaluz-Westreicher>
- Aragão, A., Jacobs, S., & Cliquet, A. (2016). What's law got to do with it? Why environmental justice is essential to ecosystem service valuation. *Ecosystem Services*, 22, 221-227. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.09.012>
- Arc, L. (2024, marzo 18). Introduction to Environment and Environmental Law: Scope and Importance. *Lawyer's Arc*. <https://lawyersarc.in/introduction-to-environment-and-environmental-law-scope-and-importance/>
- ASALE, R.-, & RAE. (2024). *Ambiente | Diccionario de la lengua española*. «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario. <https://dle.rae.es/ambiente>
- Azal, B. (2022). The role of biotic and abiotic components in biodiversity. *Journal of Biodiversity and Conservation Research*, 1-2.
- Banta, J. A., & Richards, C. L. (2018). Quantitative epigenetics and evolution. *Heredity*, 121(3), 210-224. <https://doi.org/10.1038/s41437-018-0114-x>

- Baron, J., Hall, E. K., Nolan, B. T., Finlay, J. C., Bernhardt, E. S., Harrison, J. A., Chan, F., & Boyer, E. W. (2013). The interactive effects of human-derived nitrogen loading and climate change on aquatic ecosystems of the United States. *Biogeochemistry*, 114, 71-92. <https://doi.org/10.1007/s10533-012-9788-y>
- Beier, C., Schmidt, I. K., & Kristensen, H. L. (2004). Effects of Climate and Ecosystem Disturbances on Biogeochemical Cycling in a Semi-Natural Terrestrial Ecosystem. *Water, Air and Soil Pollution: Focus*, 4(2), 191-206. <https://doi.org/10.1023/B:WAFO.0000028354.34016.af>
- Biron, M. (2020). *A Practical Guide to Plastics Sustainability: Concept, Solutions, and Implementation*. William Andrew.
- Books, M. H. B. M. H. (2003). Tansley, Sir Arthur George—Referencia de Oxford. En M. H. Books (Ed.), *A Dictionary of Scientists*. Oxford University Press. <https://www.oxfordreference.com/display/10.1093/acref/9780192800862.001.0001/acref-9780192800862-e-1348>
- Boutin, S., & Lane, J. E. (2014). Climate change and mammals: Evolutionary versus plastic responses. *Evolutionary Applications*, 7(1), 29-41. <https://doi.org/10.1111/eva.12121>
- Británica. (2024, mayo 23). *Ecosistema | Definición, componentes, ejemplos, estructura y hechos*. <https://www.britannica.com/science/ecosystem>
- Brunke, L. de la P. (2011). Responsabilidad por el daño ambiental puro y el código civil peruano. *THEMIS Revista de Derecho*, 60, 295-307.
- Bruns, M. A. (2021). 5—Bacteria and archaea. En T. J. Gentry, J. J. Fuhrmann, & D. A. Zuberer (Eds.), *Principles and Applications of Soil Microbiology (Third Edition)* (pp. 111-148). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820202-9.00005-8>
- Brusseau, M. L. (2019). Chapter 6—Ecosystems and Ecosystem Services. En M. L. Brusseau, I. L. Pepper, & C. P. Gerba (Eds.), *Environmental and Pollution Science (Third Edition)* (pp. 89-102). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814719-1.00006-9>
- Buongiorno, F., & Chiamonte, X. (2023). Environment. En N. Wallenhorst & C. Wulf (Eds.), *Handbook of the Anthropocene: Humans between Heritage and Future* (pp. 49-54). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25910-4_8
- Burt, T. P. (2013). Nitrogen Cycle. En B. Fath (Ed.), *Encyclopedia of Ecology (Second Edition)* (pp. 135-142). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.00944-1>

- Bustamante Alsina, J. (1995). *Derecho ambiental: Fundamentación y normativa*. Abeledo-Perrot.
- Cafferatta, N. (2009). Sentencia colectiva ambiental en el caso Riachuelo. *Revista de Derecho Ambiental*, 3, Article 3.
- Carlos Espín de Gea, J. (2008). 17—Postharvest enhancement of bioactive compounds in fresh produce using abiotic stresses. En F. A. Tomás-Barberán & M. I. Gil (Eds.), *Improving the Health-Promoting Properties of Fruit and Vegetable Products* (pp. 431-448). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845694289.4.431>
- CEPAL United Nations. (2019, junio 19). *Nuevo documento de la CEPAL analiza valores del costo social del carbono para la construcción de políticas públicas sobre cambio climático en la región* [Text]. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. <https://www.cepal.org/es/noticias/nuevo-documento-la-cepal-analiza-valores-costosocial-carbono-la-construccion-politicas>
- Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano. (1972). *Declaración de Estocolmo*. gob.mx. <http://www.gob.mx/semarnat/educacionambiental/documentos/declaracion-de-estocolmo>
- CONSTITUCION POLITICA DEL PERU 1979. (s. f.). Recuperado 27 de mayo de 2024, de <https://www.congreso.gob.pe/Docs/sites/webs/quipu/constitu/1979.htm>
- Constitución Política del Perú 1993. (s. f.). Recuperado 27 de mayo de 2024, de <https://www.gob.pe/institucion/presidencia/informes-publicaciones/196158-constitucion-politica-del-peru>
- Constitution of the United Mexican States. (1824). *Federal Constitution of the United Mexican States (1824)*. <https://tarlton.law.utexas.edu/constitutions/federal-mexican-1824-en/introduction>
- Corominas, J. (1973). *breve diccionario etimológico de la lengua castellana de corominas joan—Iberlibro*. <https://www.iberlibro.com/buscar-libro/titulo/breve-diccionario-etimologico-de-la-lengua-castellana/autor/corominas-joan/>
- CRTD. (1989). *Acuerdo sobre la Responsabilidad Civil por daños causados durante el transporte de mercancías Peligrosas*. <http://www.traficoadr.com/alfaqes/crtd.htm>
- Cruzado, C. A. N. (2018). Las condiciones eximentes de responsabilidad administrativa en el Texto Único Ordenado de la Ley del Procedimiento Administrativo General y su incidencia en la legislación ambiental. *Derecho PUCP*, 80, Article 80. <https://doi.org/10.18800/derechopucp.201801.009>

- Cuadrado, D. G. (2017). Microbial Mats: Impact on Geology. En *Reference Module in Life Sciences*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.13076-6>
- Daniel, D. W., Smith, L. M., McMurry, S. T., Tangen, B. A., Dahl, C. F., Jr, N. H. E., & LaGrange, T. (2019). Effects of Land Use on Greenhouse Gas Flux in Playa Wetlands and Associated Watersheds in the High Plains, USA. *Agricultural Sciences*, 10(2), Article 2. <https://doi.org/10.4236/as.2019.102016>
- de Trazegnies Granda, F. (2001). *La responsabilidad extracontractual: Arts. 1969-1988. T. I.* Pontificia Universidad Católica del Perú. Fondo Editorial. <https://repositorio.pucp.edu.pe/index/handle/123456789/74>
- Decomposers*. (2024). <https://education.nationalgeographic.org/resource/decomposers>
- Decreto Legislativo N° 613—Código del Medio Ambiente y los Recursos Naturales.* | *FALEX*. (s. f.). Recuperado 12 de junio de 2024, de <https://www.fao.org/faolex/results/details/en/c/LEX-FAOC003870/>
- Diccionario de cáncer del NCI - NCI. (2011, febrero 2). *Definición de homeostasis* (nciglobal,ncienterprise) [nciAppModulePage]. <https://www.cancer.gov/espanol/publicaciones/diccionarios/diccionario-cancer/def/homeostasis>
- Directiva—2004/35—ES - EUR*. (2004, abril 21). <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2004/35/oj>
- Esteve, J. (2006). Derecho y medio ambiente: Problemas generales; El Derecho del medio ambiente como Derecho de decisión y gestión de riesgos. *Revista electrónica del Departamento de Derecho de la Universidad de La Rioja, REDUR, ISSN 1695-078X, N°. 4, 2006*. <https://doi.org/10.18172/rezur.3978>
- Estimación de los contenidos de carbono de la biomasa aérea en los bosques de Perú.* (2014). <https://www.gob.pe/institucion/minam/informes-publicaciones/2704-estimacion-de-los-contenidos-de-carbono-de-la-biomasa-aerea-en-los-bosques-de-peru>
- étrangères, M. de l'Europe et des A. (2023, diciembre 18). *Francia Diplomacia*. Francia Diplomacia - Ministerio para Europa y de Asuntos Exteriores. <https://www.diplomatie.gouv.fr/es/politica-exterior/clima-y-medio-ambiente/>
- Exp. N° 0018-2001-AI*. (s. f.). Recuperado 27 de mayo de 2024, de <https://www.tc.gob.pe/jurisprudencia/2003/00018-2001-AI.html>
- Exp. N° 0048-2004-PI*. (2005, abril 1). <https://tc.gob.pe/jurisprudencia/2005/00048-2004-AI%20Admisibilidad.html>

- FAO -Organización de las naciones unidas para la agricultura y alimentación. (1996). *Ecología y enseñanza rural*. <https://www.fao.org/4/w1309s/w1309s00.htm#TopOfPage>
- Fath, B. D., Jørgensen, S. E., Patten, B. C., & Straškraba, M. (2004). Ecosystem growth and development. *Biosystems*, 77(1), 213-228. <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2004.06.001>
- Fellmeth, A. X., & Horwitz, M. (2011). Res communis (omnium). En *Guide to Latin in International Law*. Oxford University Press. <https://www.oxfordreference.com/display/10.1093/acref/9780195369380.001.0001/acref-9780195369380-e-1816>
- Finzi, A. C., Austin, A. T., Cleland, E. E., Frey, S. D., Houlton, B. Z., & Wallenstein, M. D. (2011). Responses and feedbacks of coupled biogeochemical cycles to climate change: Examples from terrestrial ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(1), 61-67. <https://doi.org/10.1890/100001>
- Fitch, M. W. (2014). 3.14—Constructed Wetlands. En S. Ahuja (Ed.), *Comprehensive Water Quality and Purification* (pp. 268-295). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382182-9.00053-0>
- Flexi responde: ¿Cómo afectan las actividades humanas a los ciclos biogeoquímicos?* | Fundación CK-12. (s. f.). Recuperado 16 de octubre de 2024, de <https://www.ck12.org/flexi/life-science/water-cycle/how-do-human-activities-impact-biogeochemical-cycles/>
- Flores, A., Pineda Ojeda, T., Flores Ayala, E., Flores, A., Pineda Ojeda, T., & Flores Ayala, E. (2019). Potencial de reforestación de seis especies de pino para la restauración de zonas degradadas. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 10(55), 171-179. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i55.604>
- Franks, D. M., Davis, R., Bebbington, A. J., Ali, S. H., Kemp, D., & Scurrah, M. (2014). Conflict translates environmental and social risk into business costs. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(21), 7576-7581. <https://doi.org/10.1073/pnas.1405135111>
- García Curilaf, C. I., & Denegri, G. M. (2016). Supuestos epistemológicos y ontológicos presentes en la historia de la ecología. *Ecología austral*, 26(3), 221-228.
- Gautam, S. K., Tripathi, J. K., & Singh, S. K. (2021). Chapter 5—Assessing the suitability of Ghaghra River water for irrigation purpose in India. En P. K. Srivastava, M. Gupta, G. Tsakiris, & N. W. Quinn (Eds.), *Agricultural Water Management* (pp. 67-81). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812362-1.00005-9>

- Gazmuri, I. de la M. (2007). Tratado de responsabilidad extracontractual. *Anuario de Derecho Civil*, 3, Article 3.
- Ghodke, S. A., Maheshwari, U., Gupta, S., & Bhanvase, B. A. (2023). Treatment of hazardous industrial solid wastes from electroplating industry: A comprehensive review. En N. A. Raut, D. M. Kokare, B. A. Bhanvase, K. R. Randive, & S. J. Dhoble (Eds.), *360-Degree Waste Management, Volume 2* (pp. 141-167). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90909-9.00002-2>
- Gobierno de España. (2007, octubre 24). *Ley 26/2007, de Responsabilidad Medioambiental*. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2007-18475>
- Golley B. (1996). *A History of the Ecosystem Concept in Ecology: More Than the Sum of the Parts*. <https://bookshop.org/p/books/a-history-of-the-ecosystem-concept-in-ecology-more-than-the-sum-of-the-parts-frank-b-golley/6641426>
- Gomez-Marquez, J. (2022). *A New Look at the Concept of Ecosystem* (2022020202). Preprints. <https://doi.org/10.20944/preprints202202.0202.v1>
- Granstrand, O., & Holgersson, M. (2020). Innovation ecosystems: A conceptual review and a new definition. *Technovation*, 90-91, 102098. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2019.102098>
- Guo, R. (2021). 12—Cross-border natural disaster and crisis management. En R. Guo (Ed.), *Cross-Border Resource Management (Fourth Edition)* (pp. 371-400). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91870-1.00012-4>
- Ha, M., Pittenger, J., Staffero, L., Stollberg, J., & Tanabe, J. (2020, mayo 27). 7.3: *Biogeochemical Cycles*. Biology LibreTexts. [https://bio.libretexts.org/Bookshelves/Ecology/Environmental_Science_\(Ha_and_Schleiger\)/02%3AEcology/2.04%3AEcosystems/2.4.03%3ABiogeochemical_Cycles](https://bio.libretexts.org/Bookshelves/Ecology/Environmental_Science_(Ha_and_Schleiger)/02%3AEcology/2.04%3AEcosystems/2.4.03%3ABiogeochemical_Cycles)
- Ha, M., & Schleiger, R. (2021, septiembre 16). *Energy Flow Through Ecosystems*. Biology LibreTexts. [https://bio.libretexts.org/Courses/University_of_Pittsburgh/Environmental_Science_\(Whittinghill\)/15%3A_Community_and_Ecosystem_Ecology/15.05%3A_Energy_Flow_Through_Ecosystems](https://bio.libretexts.org/Courses/University_of_Pittsburgh/Environmental_Science_(Whittinghill)/15%3A_Community_and_Ecosystem_Ecology/15.05%3A_Energy_Flow_Through_Ecosystems)
- Haldar, S. K. (2013). *Introduction to Mineralogy and Petrology*. Elsevier.
- Harrisson, K. A., Pavlova, A., Telonis-Scott, M., & Sunnucks, P. (2014). Using genomics to characterize evolutionary potential for conservation of wild populations. *Evolutionary Applications*, 7(9), 1008-1025. <https://doi.org/10.1111/eva.12149>
- Hassan Al Sharrh, A. (2007). *La frontera entre Kuwait e Irak: Alteración territorial y replanteo fronterizo* [[Http://purl.org/dc/dcmitype/Text](http://purl.org/dc/dcmitype/Text), Universidad de Salamanca]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=176282>

- Hedges, J. I. (1992). Global biogeochemical cycles: Progress and problems. *Marine Chemistry*, 39(1), 67-93. [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(92\)90096-S](https://doi.org/10.1016/0304-4203(92)90096-S)
- Hendry, A. P., Kinnison, M. T., Heino, M., Day, T., Smith, T. B., Fitt, G., Bergstrom, C. T., Oakeshott, J., Jørgensen, P. S., Zalucki, M. P., Gilchrist, G., Southerton, S., Sih, A., Strauss, S., Denison, R. F., & Carroll, S. P. (2011). Evolutionary principles and their practical application. *Evolutionary Applications*, 4(2), 159-183. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2010.00165.x>
- Hobbs, R., Hallett, L., & Ehrlich, P. (2011). Intervention Ecology: Applying Ecological Science in the Twenty-first Century. *BioScience*, 61, 442-450. <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.6.6>
- Hobbs, R. J., Higgs, E., Hall, C. M., Bridgewater, P., Chapin III, F. S., Ellis, E. C., Ewel, J. J., Hallett, L. M., Harris, J., Hulvey, K. B., Jackson, S. T., Kennedy, P. L., Kueffer, C., Lach, L., Lantz, T. C., Lugo, A. E., Mascaro, J., Murphy, S. D., Nelson, C. R., ... Yung, L. (2014). Managing the whole landscape: Historical, hybrid, and novel ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 12(10), 557-564. <https://doi.org/10.1890/130300>
- Huang, T., Hu, Q., Shen, Y., Anglés, A., & Fernández-Remolar, D. C. (2024). Biogeochemical Cycles. En S. M. Scheiner (Ed.), *Encyclopedia of Biodiversity (Third Edition)* (pp. 393-407). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822562-2.00347-9>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Ed.). (2014). Carbon and Other Biogeochemical Cycles. En *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 465-570). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.015>
- Ivette, A. (2021, mayo 4). *Costo ecológico*. Economipedia. <https://economipedia.com/definiciones/costo-ecologico.html>
- Jeremias, G., Barbosa, J., Marques, S. M., Asselman, J., Gonçalves, F. J. M., & Pereira, J. L. (2018). Synthesizing the role of epigenetics in the response and adaptation of species to climate change in freshwater ecosystems. *Molecular Ecology*, 27(13), 2790-2806. <https://doi.org/10.1111/mec.14727>
- Keiser, A. D., Knoepp, J. D., & Bradford, M. A. (2016). Disturbance Decouples Biogeochemical Cycles Across Forests of the Southeastern US. *Ecosystems*, 19(1), 50-61. <https://doi.org/10.1007/s10021-015-9917-2>
- Khalatbari, Y., Hermidas Bavand, D., Zare, A., & Poorhashemi, S. A. (2016). Development of the concept of “Environmental Damage” in International environmental law. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 14(4), 339-350.

- King, T. W., Vynne, C., Miller, D., Fisher, S., Fitkin, S., Rohrer, J., Ransom, J. I., & Thornton, D. H. (2021). The influence of spatial and temporal scale on the relative importance of biotic vs. Abiotic factors for species distributions. *Diversity and Distributions*, 27(2), 327-343. <https://doi.org/10.1111/ddi.13182>
- Kingsolver, J. G., & Buckley, L. B. (2017). Quantifying thermal extremes and biological variation to predict evolutionary responses to changing climate. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 372(1723), 20160147. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0147>
- Knapp, S. (2019, mayo 22). Ecosystem—Definition, Examples and Types. *Biology Dictionary*. <https://biologydictionary.net/ecosystem/>
- Krivtsov, V. (2008). Indirect Effects in Ecology. En S. E. Jørgensen & B. D. Fath (Eds.), *Encyclopedia of Ecology* (pp. 1948-1958). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00693-5>
- Krohs, U., & Zimmer, M. (2023). Do ecosystems have functions? *Ecology and Evolution*, 13(9), e10458. <https://doi.org/10.1002/ece3.10458>
- Lakyda, P., Shvidenko, A., Bilous, A., Myroniuk, V., Matsala, M., Zibtsev, S., Schepaschenko, D., Holiaka, D., Vasylyshyn, R., Lakyda, I., Diachuk, P., & Kraxner, F. (2019). Impact of Disturbances on the Carbon Cycle of Forest Ecosystems in Ukrainian Polissya. *Forests*, 10(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/f10040337>
- Lens, P. (2009). Sulfur Cycle. En M. Schaechter (Ed.), *Encyclopedia of Microbiology (Third Edition)* (pp. 361-369). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012373944-5.00057-2>
- Lewis, J. S., Farnsworth, M. L., Burdett, C. L., Theobald, D. M., Gray, M., & Miller, R. S. (2017). Biotic and abiotic factors predicting the global distribution and population density of an invasive large mammal. *Scientific Reports*, 7(1), 44152. <https://doi.org/10.1038/srep44152>
- Ley del Consejo Nacional del Ambiente | SINIA*. (s. f.). Recuperado 12 de junio de 2024, de <https://sinia.minam.gob.pe/normas/ley-consejo-nacional-ambiente>
- Ley N° 27444—Ley del Procedimiento Administrativo General*. (2001, abril 11). https://spijweb.minjus.gob.pe/sdm_downloads/ley-n-27444-ley-del-procedimiento-administrativo-general/
- Ley N° 28611—Ley General del Ambiente*. (s. f.). Recuperado 9 de abril de 2024, de <https://www.informea.org/es/legislation/ley-n%C2%BA-28611-ley-general-del-ambiente>

- Ley N° 28611—Ley General del Ambiente.* (2005, octubre 15). <https://www.gob.pe/institucion/congreso-de-la-republica/normas-legales/3569-28611>
- Lim, C. H., Lim, B. S., Kim, A. R., Kim, D. U., Seol, J. W., Pi, J. H., Lee, H., & Lee, C. S. (2022). Chapter 7—Climate change adaptation through ecological restoration. En M. K. Jhariya, R. S. Meena, A. Banerjee, & S. N. Meena (Eds.), *Natural Resources Conservation and Advances for Sustainability* (pp. 151-172). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822976-7.00013-2>
- Llanos, J. (2024, septiembre 26). *Perú adoptará innovadora técnica de Egipto para reforestar zonas afectadas por incendios forestales | Sociedad | La República.* <https://larepublica.pe/sociedad/2024/09/24/peru-adoptara-innovadora-tecnica-de-egipto-para-reforestar-zonas-afectadas-por-incendios-forestales-1462896>
- Lozano, B. (2022). La ciencia y el derecho ante el cambio climático. *Journal of Human Security and Global Law*, 1, 31-66. <https://doi.org/10.5565/rev/jhsgl.31>
- Mackey, K. R. M., & Paytan, A. (2009). Phosphorus Cycle. En M. Schaechter (Ed.), *Encyclopedia of Microbiology (Third Edition)* (pp. 322-334). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012373944-5.00056-0>
- Maderero, D. D. F. (2017, enero 27). El valor económico de los bosques es 5 veces más alto que los costos para conservarlos. *Forestal Maderero.* <https://www.forestalmaderero.com/articulos/item/el-valor-de-bosques-5-veces-mas-alto-que-para-conservarlos.html>
- Martínez, J. P. (2022). Algunos problemas en torno a la asunción del coste de los daños por los actos propios de otros, en el ámbito de la responsabilidad civil. *CEFLegal. Revista práctica de derecho*, 5-32. <https://doi.org/10.51302/cefllegal.2022.9277>
- Martínez-Calcerrada y Gómez, L. (2013). La responsabilidad civil y el daño moral. *Anales de la Real Academia de Doctores*, 17(1), 57-66.
- McLauchlan, K. K., Higuera, P. E., Gavin, D. G., Perakis, S. S., Mack, M. C., Alexander, H., Battles, J., Biondi, F., Buma, B., Colombaroli, D., Enders, S. K., Engstrom, D. R., Hu, F. S., Marlon, J. R., Marshall, J., McGlone, M., Morris, J. L., Nave, L. E., Shuman, B., ... Williams, J. J. (2014). Reconstructing Disturbances and Their Biogeochemical Consequences over Multiple Timescales. *BioScience*, 64(2), 105-116. <https://doi.org/10.1093/biosci/bit017>
- MEF. (2020, febrero 13). *Viceministro Quijandria: “El precio al carbono es un mecanismo que cobra mayor relevancia si buscamos alcanzar la ambición climática del Perú”.* <https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/81533-viceministro-quiandria-el-precio-al-carbono-es-un-mecanismo-que-cobra-mayor-relevancia-si-buscamos-alcanzar-la-ambicion-climatica-del-peru>

- Meteored. (2019, noviembre 9). *Mejor comprensión del ciclo global del carbono*. Tiempo.com | Meteored. <https://www.tiempo.com/ram/mejor-comprension-del-ciclo-global-del-carbono.html>
- MINAM. (2024a). *Iniciativas para reducir las emisiones de carbono*. Conservación de bosques para la mitigación del cambio climático. <https://www.minam.gob.pe/programa-bosques/iniciativas-para-reducir-las-emisiones-de-carbono/>
- MINAM. (2024b). *Principales iniciativas en el Perú*. Conservación de bosques para la mitigación del cambio climático. <https://www.minam.gob.pe/programa-bosques/principales-iniciativas-en-el-peru/>
- Monitoring of the Andean Amazon Project. (2018, abril 2). *MAAP #81: Carbon loss & protection in the Peruvian Amazon*. <https://www.maaproject.org/es/peru-carbono/>
- Monitoring of the Andean Amazon Project. (2021, noviembre 5). MAAP #148: Carbon loss & protection in the Peruvian Amazon. *MAAP*. <https://www.maaproject.org/peru-carbon-2020/>
- Morón, J. C. M. (2007). Perspectiva Constitucional del Silencio Administrativo Positivo ¿Quién calla otorga? ¿Pero qué otorga? *Derecho & Sociedad*, 29, 83-93.
- Morris, L. A. (2004). SOIL DEVELOPMENT AND PROPERTIES | Nutrient Cycling. En J. Burley (Ed.), *Encyclopedia of Forest Sciences* (pp. 1227-1235). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-145160-7/00242-8>
- Mosqueira Céspedes, C. J. (2022, junio 15). *El seguro ambiental obligatorio como un verdadero instrumento de gestión ambiental*. <https://aidca.org/ridca1-ambiental-mosqueira-elseguro/>
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2019, febrero 1). *Carbon cycle*. <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/climate/carbon-cycle>
- Ondarse Álvarez, D. (2024, agosto 3). Ciclo del carbono—Qué es, sus etapas e importancia. *Ciclo del carbono*. <https://concepto.de/ciclo-del-carbono/>
- ONU. (2010, junio 16). *Convenio sobre Responsabilidad Internacional por Daños Causados por Objetos Espaciales (1972)*. <https://www.dipublico.org/3449/convenio-sobre-responsabilidad-internacional-por-danos-causados-por-objetos-espaciales-1972/>
- ONU Turismo. (2020). *Las emisiones de CO2 del sector turístico correspondientes al transporte – Modelización de resultados* | World Tourism Organization. Default Book Series. <https://www.e-unwto.org/doi/book/10.18111/9789284421992>

- Papayannis, D. M. (2014). La práctica del Alterum Non Laedere. *Isonomía - Revista de teoría y filosofía del derecho*, 41, Article 41. <https://doi.org/10.5347/41.2014.89>
- Parker, S. P., & Corbitt, R. A. (1993). *McGraw-Hill encyclopedia of environmental science & engineering* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Perú. Ministerio del Ambiente & Carnegie Institution for Science (Eds.). (2014). *La geografía del carbono en alta resolución del Perú: Un informe conjunto del observatorio aéreo Carnegie y el Ministerio del Ambiente del Perú*. MINAM.
- Procuraduría Federal de Protección. (2014, septiembre 30). *LEY FEDERAL DE RESPONSABILIDAD AMBIENTAL DE MÉXICO*. gov.mx. <http://www.gob.mx/profepa/documentos/ley-federal-de-responsabilidad-ambiental>
- Professor, B. (2024). *What is an Ecosystem? Biotic Factors, Abiotic Factors, Habitats and Niches Explained | Grade 6-8 Life Science*. Speedy Publishing LLC.
- Puente Brunke, L. de la. (2012). *Adecuación del derecho de daños peruano a las particularidades del daño ambiental: Los residuos sólidos peligrosos*. <https://biblioteca.spda.org.pe/biblioteca/catalogo/ver.php?id=8769>
- RAE. (2023). *Diccionario panhispánico del español jurídico—RAE*. Diccionario panhispánico del español jurídico - Real Academia Española. <https://dpej.rae.es/lema/ambiente>
- Remick, K., & Helmann, J. D. (2023). The Elements of Life: A Biocentric Tour of the Periodic Table. *Advances in microbial physiology*, 82, 1-127. <https://doi.org/10.1016/bs.ampbs.2022.11.001>
- Resolución N° 010-2013-OEFA/CD*. (2013). <https://www.gob.pe/institucion/oefa/normas-legales/214417-010-2013-oefa-cd>
- Resolución N° 292-2013-OEFA/TFA*. (2013, diciembre 27). <https://www.gob.pe/institucion/oefa/informes-publicaciones/1845249-resolucion-n-292-2013-oefa-tfa>
- Rhoton, S. (2013). *Ciclo del Nitrógeno: Qué es, sus Etapas e Importancia (con dibujo)*. Enciclopedia Significados. <https://www.significados.com/ciclo-del-nitrogeno/>
- Ripka de Almeida, A., da Silva, C. L., Hernández Santoyo, A., Ripka de Almeida, A., da Silva, C. L., & Hernández Santoyo, A. (2018). Métodos de valoración económica ambiental: Instrumentos para el desarrollo de políticas ambientales. *Revista Universidad y Sociedad*, 10(4), 246-255.
- Rubio Correa, M., Eguiguren Praeli, F., & Bernalles Ballesteros, E. (2011). *Fondo Editorial PUCP: Artículo 2 inciso 22*. <https://www.coursehero.com/file/pj76tgd/Fondo-Editorial-PUCP-Art%C3%ADculo-2-inciso-22-623-conocimiento-y-capacidades-a-lo/>

- Ruda Gonzales, A. (2008). *El daño ecológico puro. La responsabilidad civil por el deterioro del medio ambiente, con especial atención a la Ley 26/2007, de 23 de octubre, de responsabilidad medioambiental*. <https://revistas.mjusticia.gob.es/index.php/ADC/article/view/8221>
- Salazar Iglesias, S. S. (2008). *Estudio de procesos ecológicos para el desarrollo sostenible del Castaño (Castanea sativa Mill.) de la sierra de Francia* (pp. 19-22) [Tesis doctoral]. Universidad de Salamanca. <https://digital.csic.es/bitstream/10261/10206/1/TESIS.pdf>
- Sales, L. P., Hayward, M. W., & Loyola, R. (2021). What do you mean by “niche”? Modern ecological theories are not coherent on rhetoric about the niche concept. *Acta Oecologica*, 110, 103701. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2020.103701>
- San Martin Villaverde, D., & Ruiz-Rico, G. (2015). *El daño ambiental: Un estudio de la institución del derecho ambiental y el impacto en la sociedad* (1a. Ed). Grijley.
- Sanati, A., Malayeri, M. R., Busse, O., & Weigand, J. J. (2022). Utilization of ionic liquids and deep eutectic solvents in oil operations: Progress and challenges. *Journal of Molecular Liquids*, 361, 119641. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.119641>
- Sánchez, A. C. (2008). Libros. RUDA GONZÁLEZ, Albert: El daño ecológico puro. La responsabilidad civil por el deterioro del medio ambiente, con especial atención a la Ley 26/2007, de 23 de octubre, de responsabilidad medioambiental, (prólogo de Miquel Martín Casals), ed. Thomso. *Anuario de Derecho Civil*, 4, Article 4. <https://revistas.mjusticia.gob.es/index.php/ADC/article/view/8221>
- Sánchez Díaz, J. S., Martínez Rodríguez, E. A., Peniche Moguel, K. G., Díaz Gutiérrez, S. P., Pin Gutiérrez, E., Cortés Román, J. S., Rivera Solís, G., Sánchez Díaz, J. S., Martínez Rodríguez, E. A., Peniche Moguel, K. G., Díaz Gutiérrez, S. P., Pin Gutiérrez, E., Cortés Román, J. S., & Rivera Solís, G. (2018). Interpretación de gasometrías: Solo tres pasos, solo tres fórmulas. *Medicina crítica (Colegio Mexicano de Medicina Crítica)*, 32(3), 156-159.
- Sánchez Fernández, A. W., & Herrera Tufino, I. (1998). Geología de los cuadrángulos de Moyobamba, Saposoa y Juanjui, hojas: 13-j, 14-j y 15-j – [Boletín A 122]. *Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET*. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/82>
- Schlesinger, W. H., & Bernhardt, E. S. (2013). *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change*. Academic Press.

- Sentencia 146/1994, de 12 de mayo.* (1994, mayo 12). <https://hj.tribunalconstitucional.es/ca-ES/Resolucion/Show/2663>
- Sentencia 219/1988, de 22 de noviembre.* (1988). <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-T-1988-29167>
- Sentencia 245/1991, 16 de diciembre.* (1991, diciembre 16). <https://hj.tribunalconstitucional.es/es/Resolucion/Show/1884>
- SINIA. (2023, marzo). *Guía de Valoración Económica de Impactos Ambientales en el marco del Sistema Nacional de Evaluación del Impacto Ambiental (SEIA) | SINIA.* <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/guia-valoracion-economica-impactos-ambientales-marco-sistema>
- Smith, V. H., Joye, S. B., & Howarth, R. W. (2006). Eutrophication of freshwater and marine ecosystems. *Limnology and Oceanography*, *51*(1part2), 351-355. https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.1_part_2.0351
- Stiglitz, G., & Rusconi, D. (2010). COMENTARIO BIBLIOGRÁFICO. LOS DAÑOS COLECTIVOS DE Lidia Garrido Cordobera. *Vniversitas*, *120*, 307-311.
- Suárez-Ruiz, I., & Ward, C. R. (2008). Chapter 4—Coal Combustion. En I. Suárez-Ruiz & J. C. Crelling (Eds.), *Applied Coal Petrology* (pp. 85-117). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-045051-3.00004-X>
- The World Air Quality Index. (2024). *Contaminación del aire de South Pass, Wyoming, Estados Unidos: Índice PM2.5 de Calidad del Aire (ICA) en tiempo real.* [aqicn.org](https://aqicn.org/city/usa/wyoming/south-pass/es/). <https://aqicn.org/city/usa/wyoming/south-pass/es/>
- Toth, A. (with Bobok, E.). (2017). *Flow and heat transfer in geothermal systems: Basic equations for describing and modeling geothermal phenomena and technologies.* Elsevier.
- Tsujimoto, M., Kajikawa, Y., Tomita, J., & Matsumoto, Y. (2018). A review of the ecosystem concept—Towards coherent ecosystem design. *Technological Forecasting and Social Change*, *136*, 49-58. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.06.032>
- University of Cambridge. (2024, mayo 22). *Ecosystem.* <https://dictionary.cambridge.org/es/diccionario/ingles/ecosystem>
- University of Michigan. (2017, octubre 20). *The Concept of the Ecosystem.* <https://www.globalchange.umich.edu/globalchange1/current/lectures/klingsystem/ecosystem/ecosystem.html>
- University of Oxford. (2024). *Oxford Reference—Answers with Authority.* Oxford Reference. <https://www.oxfordreference.com/>

- US EPA, O. (2015, agosto 28). *Greenhouse Gas Equivalencies Calculator* [Data and Tools]. <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator>
- Valenzuela Rendón, A. I. (2015). The damage to the environment: A view from Law. *Athens Journal of Law, Atenas*. <https://doi.org/10.30958/ajl.1-2-3>
- Vallero, D. A. (2022). Chapter 4—Potential impacts of climate change on biogeochemical cycling. En T. M. Letcher (Ed.), *Water and Climate Change* (pp. 41-62). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99875-8.00017-3>
- Vallero, D. A. (2023). *Air Pollution Calculations: Quantifying Pollutant Formation, Transport, Transformation, Fate and Risks*. Elsevier.
- Valorización económica del bosque inundable.pdf*. (s. f.).
- Vera-Reyes, I., Vázquez-Núñez, E., Castellano, L. E., Bautista, D. I. A., Valenzuela Soto, J. H., & Valle-García, J. D. (2023). Chapter 8—Biointeractions of plants–microbes–engineered nanomaterials. En G. D. La Rosa & J. R. Peralta-Videa (Eds.), *Physicochemical Interactions of Engineered Nanoparticles and Plants* (Vol. 4, pp. 201-231). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90558-9.00001-2>
- Vidal Ramos, R. P. (2013). *La Responsabilidad civil por daño ambiental en el sistema peruano*. <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/item/91cf9309-8df8-42c5-b346-6563aecd7e34>
- Wang, H., Lv, G., Cai, Y., Zhang, X., Jiang, L., & Yang, X. (2021). Determining the effects of biotic and abiotic factors on the ecosystem multifunctionality in a desert-oasis ecotone. *Ecological Indicators*, 128, 107830. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107830>
- Weiskopf, S. R., Rubenstein, M. A., Crozier, L. G., Gaichas, S., Griffis, R., Halofsky, J. E., Hyde, K. J. W., Morelli, T. L., Morissette, J. T., Muñoz, R. C., Pershing, A. J., Peterson, D. L., Poudel, R., Staudinger, M. D., Sutton-Grier, A. E., Thompson, L., Vose, J., Weltzin, J. F., & Whyte, K. P. (2020). Climate change effects on biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States. *Science of The Total Environment*, 733, 137782. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137782>
- Woodmansee, R. G. (1990). Biogeochemical Cycles and Ecological Hierarchies. En I. S. Zonneveld & R. T. T. Forman (Eds.), *Changing Landscapes: An Ecological Perspective* (pp. 57-71). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3304-6_5

- Xu, Q., & Khan, M. I. (2023). Reflections on the environmental damage compensation regime in Chinese civil legislations. *Heliyon*, 9(4), e15154. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15154>
- Zsögön, S. J. de. (2024, mayo 27). *Manual para el estudio del derecho ambiental*. Librotea. <https://librotea.eldiario.es/libros/manual-para-el-estudio-del-derecho-ambiental>

Libro electrónico disponible en
<http://fondoeditorial.unah.edu.pe/index.php/fonedi/catalog>
Publicado en el Perú / Published in Peru.

DAÑO AMBIENTAL

Karina Milagros Ordóñez Ruiz
Luis Alberto Ordóñez Ruiz
Luis Alberto Ordóñez Sánchez

ISBN: 978-612-99039-0-3



9 786129 903903