



EDITORIAL ANDES COGNITTO

EVALUACIÓN AMBIENTAL INTEGRADA

ECONOMÍA CIRCULAR, CAMBIO CLIMÁTICO
Y TRANSFORMACIÓN DIGITAL
PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE



Adriana Yamillet Herrera Granizo
Fausto Danilo Erazo Guizarro
Natalia Estefanía Herrera Salazar
Lilí Carolina Salcedo Vallejo



Editorial Andes Cognition

EVALUACIÓN AMBIENTAL INTEGRADA ECONOMÍA CIRCULAR, CAMBIO CLIMÁTICO Y TRANSFORMACIÓN DIGITAL PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

© Autores

Adriana Yamilet Herrera Granizo

Correo: ayherrera@espe.edu.ec

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5090-5981>

Institución: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sangolquí, Ecuador

Fausto Danilo Erazo Guijarro

Correo: fderazo1@espe.edu.ec

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8628-8898>

Institución: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sangolquí, Ecuador

Natalia Estefanía Herrera Salazar

Correo: neherrera1@espe.edu.ec

Orcid: <https://orcid.org/0009-0001-5387-9763>

Institución: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sangolquí, Ecuador

Lilí Carolina Salcedo Vallejo

Correo: lcsalcedo@espe.edu.ec

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2150-2387>

Institución: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sangolquí, Ecuador

Editorial "ANDES COGNITIO EDAC S.A.S."

DEPARTAMENTO DE EDICIÓN

Editado y Distribuido por:

Editorial: Andes Cognito
Sello Editorial: 978-9942-7408
Teléfono: 0995805659
Web: <https://andescognitio.org>
ISBN: 978-9907-9566-5-8
DOI: <https://doi.org/10.64230/2d2v0654>

© Primera Edición
© Septiembre 2026
Impreso en Ecuador

Revisión de Ortografía

Lcda. Cristina Paola Chamorro Ortega

Diseño de Portada

Ing. Pamela Rosa Taco Hernández Mgs

Diagramación

Ing. Yoselyn Andrea Rogel Gaibor

Director Editorial

Ec. Juan F. Villacis U. Mgs.

Aviso Legal

El contenido de este libro incluyendo textos, imágenes, gráficos, tablas, cuadros y referencias bibliográficas es de exclusiva responsabilidad del/ de los autor (es). Las opiniones, datos y criterios expresados no representan necesariamente la postura institucional ni el pensamiento de la Editorial Andes Cognito.

Derechos de Autor ©

Este documento se publica bajo los términos y condiciones de la Licencia Creative Commons Reconocimiento – No Comercial – CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).



Todos los derechos de autor y de propiedad intelectual e industrial relativos al contenido de esta publicación pertenecen exclusivamente a la “Editorial Andes Cognitio” y a sus respectivos autores. Queda expresamente prohibida, bajo las sanciones establecidas por la legislación vigente, la reproducción total o parcial de esta obra, su almacenamiento en sistemas informáticos, su tratamiento digital, así como cualquier forma de distribución, transmisión o comunicación pública por medios electrónicos, mecánicos, ópticos, químicos, de grabación o fotocopia sin la debida autorización previa y por escrito de los titulares del copyright.

Se exceptúan únicamente los usos con fines académicos o de investigación científica, siempre que no persigan propósitos comerciales y se realicen de forma gratuita, debiendo citarse en todo momento a la fuente editorial correspondiente. Las opiniones vertidas en los distintos capítulos son de exclusiva responsabilidad de los autores y no reflejan necesariamente la postura institucional de la editorial.

Comité Científico Académico

Dr. Jorge Gualberto Paredes Gavilanez PhD.
Universidad Técnica Estatal de Quevedo

Dr. Oscar Patricio López Solís PhD.
Universidad Técnica de Ambato

Ec. Carlos Roberto López Paredes PhD.
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo Extensión Orellana

Dr. Héctor Enrique Hernández Altamirano PhD.
Universidad Técnica de Ambato

Dr. Carlos Arturo Jara Santillán PhD.
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Dr. Guillermo Carrillo Espinosa PhD,
Universidad Autónoma de Chapingo - México

Dra. Doris Coromoto Pernía Barragán PhD,
Universidad de los Andes Tachira Venezuela

Ec. María Gabriela González Bautista PhD.
Universidad Nacional de Chimborazo

My. Efraín Arguello Arellano, Mgs.
Tecnológico Universitario ARGOS – Policía Nacional del Ecuador

Ing. Liliana Priscila Campos Llerena Mgs.
Universidad Técnica de Ambato

Dr. Mario Humberto Paguay Cuvi Mgs.
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Ec. Oswaldo Javier Jácome Izurieta Mgs.
Universidad Técnica de Ambato

Ec. Juan Carlos Pèrez Briceño Mgs.
Instituto Superior Universitario Bolivariano

Dr. Luís Fernando Paz Villaeoel Mgs.
Universidad Técnica Particular de Loja

Dra. Daysi Graciela Astudillo Condo Mgs.
Universidad Nacional de Chimborazo

Ec. Ligia Ximena Tapia Hermida Mgs.
Universidad Nacional de Chimborazo

Eco. Ángel Geovanny Carrión Gavilanes MBA.
Pontificia Universidad Católica del Ecuador sede Ambato

Ing. Paula Alejandra Abdo Peralta Mgs.
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Ing. Milton Gabriel Del Hierro Mosquera Mgs.
Universidad Politécnica Estatal del Carchi

Ing. Catherine Gabriela Frey Erazo Mgs.
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Ing. Juan Enrique Ureña Moreno Mgs.
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Ing. José Fernando Esparza Parra Mgs.
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Ing. Alexis Gabriel Reinoso Haro Mgs.
Universidad Estatal de Bolívar

Eco. Adriana Yamilet Herrera Granizo MSC.
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

Eco. Jaime Fernando Andrade Guamán Mgs.
Universidad Indoamérica

Eco. Alejandro Carlos Lalama Freire Mgs.
Universidad Nacional de Chimborazo

Constancia de Arbitraje

La Editorial Andes Cognito, hace constar que este libro proviene de una investigación realizada por los autores, siendo sometido a un arbitraje bajo el sistema de doble ciego, de contenido y forma por jurados especialistas. Además, se realizó una revisión del enfoque, paradigma y método investigativo; desde la matriz epistémica asumida por los autores, aplicándose las normas APA, Séptima Edición, proceso de anti plagio en línea Compilatio, garantizándose así la científicidad de la obra.

Comité Editorial

Eco. Juan Federico Villacis Uvidia Mgs.
Director de la Editorial Andes Cognito

Lcda. Andrea Damaris Hernández Allauca PhD.
Editora de Andes Cognito

PRÓLOGO

La sostenibilidad enfrenta desafíos cada vez más complejos que no pueden comprenderse mediante análisis aislados de las dimensiones ambiental, económica, tecnológica o social. Las decisiones relacionadas con la producción, el consumo, la innovación y la gestión de recursos generan impactos interconectados que requieren enfoques capaces de evaluar simultáneamente múltiples variables y sus relaciones.

En este contexto, la Evaluación Ambiental Integrada (EAI) surge como una herramienta que permite analizar de manera conjunta los efectos ambientales, económicos, climáticos y sociales asociados a actividades, proyectos y sistemas productivos. Su propósito no es únicamente identificar impactos, sino comprender cómo estos interactúan y condicionan la sostenibilidad a largo plazo.

Esta necesidad se vuelve especialmente relevante ante la convergencia de tres grandes transformaciones globales: la transición hacia la economía circular, la urgencia de enfrentar el cambio climático y el avance acelerado de la transformación digital. La economía circular busca optimizar el uso de recursos y reducir residuos; la acción climática promueve la mitigación y adaptación frente a riesgos crecientes; mientras que las tecnologías digitales ofrecen nuevas capacidades para monitorear, analizar y gestionar información en tiempo real.

Lejos de actuar de forma independiente, estas transformaciones se encuentran estrechamente relacionadas. La digitalización puede fortalecer la circularidad mediante sistemas de trazabilidad e inteligencia artificial; la economía circular puede contribuir a reducir emisiones y presiones sobre los recursos; y las estrategias climáticas pueden orientar la selección de tecnologías y modelos productivos más sostenibles.

Este libro propone una perspectiva de Evaluación Ambiental Integrada e Inteligente, apoyada en indicadores, sistemas de información, inteligencia artificial y herramientas de análisis prospectivo. Su objetivo es proporcionar un marco conceptual y metodológico que facilite la toma de decisiones informadas, fortalezca la planificación sostenible y contribuya al desarrollo de sistemas productivos y territoriales más eficientes, resilientes y responsables con el ambiente y la sociedad.

ÍNDICE GENERAL

PRÓLOGO	2
ÍNDICE GENERAL	3
INTRODUCCIÓN.....	6
CAPÍTULO I.....	8
DE LA EVALUACIÓN AMBIENTAL TRADICIONAL A LA EVALUACIÓN	
AMBIENTAL INTEGRADA	8
1.1. La crisis ambiental como sistema multidimensional	8
1.2. El concepto de Evaluación Ambiental Integrada	13
1.3. El triángulo estratégico: circularidad, clima y digitalización	18
1.4. La paradoja de la transformación sostenible	24
1.5. Hacia un nuevo paradigma de evaluación ambiental	31
1.6. Propuesta conceptual: Sistema Ambiental Integrado de Transformación	
Sostenible	37
CAPÍTULO II	46
ECONOMÍA CIRCULAR INTELIGENTE: DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS A	
LA INTELIGENCIA DE LOS RECURSOS	46
2.1. Evolución del paradigma de economía circular	46
2.2. Del residuo al activo ambiental	49
2.3. Inteligencia artificial para la circularidad	54
2.4. Internet de las cosas y trazabilidad de los recursos	57
2.5. Pasaporte digital ambiental de productos	62
2.6. Índice de Circularidad Inteligente	66
2.7. Economía circular y competitividad empresarial	71

CAPÍTULO III	77
CAMBIO CLIMÁTICO Y HUELLA AMBIENTAL DINÁMICA: MEDIR EL IMPACTO MÁS ALLÁ DEL CARBONO	77
3.1. Cambio climático como variable económica y ambiental	77
3.2. De la huella de carbono a la huella ambiental integrada	81
3.3. La huella ambiental de la transformación digital	86
3.4. Impactos directos, indirectos y sistémicos	90
3.5. Índice de Huella Ambiental Dinámica	95
3.6. Modelización prospectiva del impacto ambiental	99
3.7. Capacidad adaptativa y resiliencia ambiental.....	103
3.8. El principio de neutralidad ambiental digital	108
CAPÍTULO IV.....	114
INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA EVALUACIÓN AMBIENTAL INTEGRADA.....	114
4.1. Inteligencia artificial y toma de decisiones ambientales	114
4.2. Big Data ambiental	117
4.3. Modelos predictivos de desempeño ambiental.....	122
4.4. Econometría ambiental y aprendizaje automático.....	126
4.5. Gemelo digital ambiental.....	130
4.6. Sistema de alerta ambiental predictiva	134
4.7. Inteligencia artificial explicable para decisiones ambientales.....	138
4.8. Índice de Inteligencia Ambiental.....	142
4.9. Riesgo de la propia digitalización	147

CAPÍTULO V	152
MODELO INTEGRADO PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE: ÍNDICE, GOBERNANZA Y ESCENARIOS DE TRANSICIÓN.....	152
5.1. Del análisis sectorial al modelo integrado	152
5.2. Arquitectura del Modelo de Evaluación Ambiental Integrada	155
5.3. Índice Integrado de Transición Sostenible — IITS	159
5.4. Construcción matemática del índice.....	163
5.5. Matriz de madurez ambiental-digital.....	166
5.6. Matriz de decisión para empresas y territorios	169
5.7. Escenarios de transición sostenible	173
5.8. Análisis costo-beneficio ambiental.....	176
5.9. Gobernanza para la transición sostenible	179
5.10. Aplicación territorial del modelo.....	183
5.11. Hacia una nueva economía ambiental predictiva	186
BIBLIOGRAFÍA	190

INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad constituye uno de los mayores retos del siglo XXI debido a la creciente presión sobre los recursos naturales, los efectos del cambio climático, la generación de residuos y la acelerada transformación tecnológica. Estos desafíos han puesto en evidencia las limitaciones de los enfoques tradicionales de evaluación ambiental, frecuentemente orientados al análisis aislado de problemas específicos. En un contexto caracterizado por la interdependencia entre los sistemas ambientales, económicos y sociales, resulta indispensable adoptar perspectivas integrales que permitan comprender la complejidad de los procesos que condicionan el desarrollo sostenible.

En este marco, Evaluación Ambiental Integrada: Economía Circular, Cambio Climático y Transformación Digital para el Desarrollo Sostenible propone una visión sistémica orientada a fortalecer la toma de decisiones mediante la integración de diferentes dimensiones de análisis. La obra parte del principio de que la sostenibilidad requiere estrategias articuladas que permitan optimizar recursos, anticipar riesgos, reducir impactos y promover la resiliencia de los territorios y sistemas productivos.

Uno de los pilares centrales es la economía circular, concebida como una alternativa al modelo lineal de extracción, producción, consumo y disposición final. Este enfoque busca mantener el valor de materiales y productos durante el mayor tiempo posible mediante prácticas como la reutilización, reparación, reciclaje y recuperación de recursos, contribuyendo a disminuir la presión sobre los ecosistemas y a mejorar la eficiencia económica.

El segundo eje corresponde al cambio climático, cuyos efectos influyen de manera creciente en la disponibilidad de recursos, la estabilidad de los ecosistemas y el bienestar social. Por ello, la evaluación ambiental debe incorporar criterios de mitigación, adaptación y resiliencia que permitan enfrentar escenarios futuros de incertidumbre.

Finalmente, la transformación digital aporta herramientas innovadoras para la recopilación, análisis y gestión de información. Tecnologías como la inteligencia artificial, los sistemas de monitoreo y la analítica avanzada fortalecen las capacidades de evaluación y planificación.



EDITORIAL ANDES COGNITIO

CAPÍTULO I

DE LA EVALUACIÓN AMBIENTAL TRADICIONAL A LA EVALUACIÓN AMBIENTAL INTEGRADA



CAPÍTULO I

DE LA EVALUACIÓN AMBIENTAL TRADICIONAL A LA EVALUACIÓN AMBIENTAL INTEGRADA

1.1. La crisis ambiental como sistema multidimensional

La coyuntura ambiental actual difícilmente se asimila como una serie de dilemas aislados. Esto es porque su génesis y repercusiones se enlazan íntimamente con las fuerzas motrices de índole económica, social, tecnológica y organizacional. Las tensiones que recaen sobre los sistemas ecológicos emanan de prácticas de manufactura, esquemas de consumo, usufructo de recursos naturales, formación de despojos y dinámicas de urbanización, las cuales coexisten e influyen mutuamente. Viendo desde esta óptica, el entorno no representa una esfera ajena a la esfera económica, sino más bien un pilar crucial en los entramados productivos y de prosperidad humana. Los investigadores Martínez et al. (2021) postulan que el análisis de la viabilidad ecológica necesita una metodología integral que articule elementos de orden social, económico, institucional y ambiental, junto con sus nexos correspondientes.

Desde el prisma económico, tal interdependencia halla su explicación en el constructo de la externalidad ambiental. Actos de producción o de consumo dan lugar a gastos, costos que no son absorbidos en su totalidad por los perpetradores de tales acciones; en cambio, son trasladados a otros participantes del mercado o a la sociedad en su conjunto. Vertidos acuáticos, menoscabo del terreno, efluvios aéreos y la disminución de la variedad de vida ilustran los gravámenes ecológicos que pueden desmarcarse de los marcos de fijación de precios tradicionales. De esto se desprende que un examen ecológico circunscrito únicamente a los niveles de polución de una faena podría pasar por alto las repercusiones económicas y sociales subsiguientes. La evaluación holística persigue justamente dilucidar los vínculos entre las circunstancias ambientales, sus orígenes, sus secuelas y las opciones para su administración.

La naturaleza sistémica intrínseca de la crisis ambiental exige asimismo la comprensión de que los elementos de la naturaleza exhiben interconexiones de mutua dependencia. El agua, la tierra, los hábitats biológicos, la provisión alimentaria y las fuentes de energía operan no en esferas aisladas, sino como integrantes de una intrincada red socioecológica.

Los estudios concernientes a las interacciones entre lo alimentario, el agua, el terreno y los entornos naturales revelan de manera concluyente que las alteraciones climáticas y las variaciones socioeconómicas tienen la capacidad de trascender las delimitaciones convencionales sectoriales, gestando consecuencias tanto indirectas como de acumulación progresiva. A título ilustrativo, una alteración en las prácticas de gestión del suelo tiene el potencial de impactar de forma concomitante la cantidad de agua disponible, los rendimientos de las cosechas, la integridad de los ecosistemas y la variedad de formas de vida presentes.

Esta interdependencia se vuelve importantísima para la creación de políticas públicas. Porque, verás, una acción dirigida a resolver un asunto podría desencadenar resultados que no se esperaban en otras partes del sistema. Mira, por ejemplo, una política que busca que la agricultura produzca más. Esto podría hacer que la gente gane más plata y que haya más comida. Pero también le sacaría más agua, más energía y más terreno al medio ambiente. De igual forma, si usamos más tecnología y nos volvemos más digitales. Esto puede hacer que se produzca mejor y se gasten menos cosas que antes se botaban. Pero al mismo tiempo, podría consumir más energía y pedir más materiales de los que se usaban. Por eso, al evaluar el medio ambiente, no solo hay que ver las cosas buenas que trae una política de golpe, sino también pensar en lo que pasa después, en lo que se sacrifica y en cómo se suman todas las cosas.

El estudio del sistema socioecológico introduce además una dimensión temporal que resulta fundamental para comprender la crisis ambiental. Las decisiones económicas actuales pueden generar beneficios inmediatos al mismo tiempo que producen costos ambientales cuyos efectos se manifiestan posteriormente. Ciertas estrategias de conservación, de manera análoga, pueden requerir desembolsos actuales cuyos beneficios económicos y ecológicos se evidencian en períodos prolongados. Martínez et al. (2021) argumentan sólidamente que precisamos modelos dinámicos. Estos modelos deben incorporar la compleja interconexión de aspectos socioeconómicos y ecológicos, además de indicadores y límites de sostenibilidad. El resultado es una evaluación que se aleja de ser puramente retrospectiva y se enfoca más bien en las probables trayectorias futuras del sistema.

Dentro de esta perspectiva, una dificultad mayor en las metodologías ambientales más comunes es la fragmentación del análisis. Un estudio podría enfocarse solamente en la

contaminación del aire, otro en la calidad del agua, otro más en los desechos y otro diferente en la biodiversidad, sin lograr establecer las interconexiones necesarias entre estas circunstancias. Cormier y Suter (2008) indican que la falta de integración entre diversos tipos de evaluaciones ambientales puede debilitar el proceso de toma de decisiones, aun cuando los distintos métodos persigan un objetivo compartido: ofrecer información científica para abordar problemas ambientales. Como resultado, se concibe un esquema orientado a vincular la valorización de las circunstancias, las motivaciones subyacentes, los pronósticos y las repercusiones resultantes.

La valoración medioambiental holística emerge, así como una solución metodológica frente a la intrincada naturaleza de las unidades socioecológicas. Sus propósitos trascienden la mera agregación de investigaciones ambientales aisladas; buscan discernir vínculos entre ellas con el fin de asimilar las fuentes, los impactos y las posibles opciones de actuación. Cormier y Suter (2008) proponen que las evaluaciones pueden organizarse en torno a cuatro funciones: identificar las condiciones ambientales, determinar las causas y fuentes de los problemas, predecir los riesgos y beneficios de diferentes acciones y evaluar posteriormente los resultados de las decisiones adoptadas. Este enfoque permite conectar diagnóstico, explicación, predicción y gestión dentro de un mismo proceso analítico.

La dimensión económica obtiene una significación singular dentro de este marco, ya que las decisiones medioambientales casi siempre conllevan costos de oportunidad inherentes. Recursos que se dirigen a la mitigación de emisiones, la optimización tecnológica, la regeneración de materiales o la salvaguarda de ecosistemas perfectamente podrían ser dedicados a otros propósitos productivos o sociales de igual o mayor calibre. Por consiguiente, la determinación ambiental se extiende más allá del mero señalamiento de la opción que menos estragos ecológicos propina; requiere una sopesada consideración de su factibilidad pecuniaria, los beneficios que reporta a la sociedad, las barreras institucionales que la circundan y los deseos intrínsecos de los actores partícipes. Cormier y Suter (2008) en sus estudios enfatizan que las evaluaciones de administración deberían amalgamar riesgos ecológicos, provechos, descalabros económicos, predilecciones de colectivos influyentes y limitaciones jurídicas.

La esfera tecnológica, en efecto, trae consigo una mayor complejidad. Innovaciones tecnológicas recientes, a pesar de su potencial para mitigar el consumo de recursos,

optimizar la manufactura y suprimir desechos, no garantizan una influencia invariablemente benéfica en todo contexto. En efecto, Piscicelli (2023) cataloga el Internet de las Cosas, análisis de datos a gran escala, analítica predictiva, manufactura aditiva, blockchain y los portales digitales entre los promotores potenciales de una economía circular. No obstante, recalca la imperativa necesidad de sopesar las ramificaciones de segundo y tercer orden, las repercusiones socioeconómicas y las contraindicaciones, como el efecto rebote. Por consiguiente, se impone una valoración de la innovación tecnológica en función de sus verdaderos logros ambientales, eludiendo un énfasis exclusivo en su capacidad teórica de optimización.

La coyuntura ecológica, ciertamente, ha de aparecerse además como una dinámica que teje vínculos recíprocos entre los colectivos humanos y el medio natural. Los quehaceres económicos alteran los parámetros ambientales y estas alteraciones, subsiguientemente, tendrán la capacidad de impactar la eficacia productiva, los desembolsos operativos, el acopio de insumos, la cimentación logística y las circunstancias sociales. En porciones geográficas precisas, por ejemplo, el menoscabo ecológico podrá disminuir el acceso a bienes productivos, elevar los gastos empresariales y engendrar estímulos inéditos para la metamorfosis de los artefactos tecnológicos empleados. La valoración holística habrá de tener la aptitud para plasmar estos enlaces de realimentación, sin ceñirse únicamente a la observación de una conexión lineal entre origen y desenlace. Tal enfoque se alinea sin reparos con las concepciones dinámicas que se proponen para escudriñar intrincados sistemas socioecológicos.

Un aspecto crucial es, sin duda, la incertidumbre. Tanto los sistemas ambientales como los económicos, intrínsecamente, se ven influenciados por fluctuaciones climáticas, avances tecnológicos repentinos, cambios demográficos acentuados, oscilaciones de precios inestables, alteración de normativas y la naturaleza impredecible del actuar de los involucrados. Por este motivo, una evaluación de impacto ambiental debe trascender una simple cifra puntual del efecto previsto. Debería, por el contrario, explorar una multiplicidad de eventualidades y trayectorias posibles. De hecho, Martínez-Fernández y colegas (2021) integran de forma deliberada la evaluación de la vulnerabilidad ante agentes externos, distintos escenarios probables, opciones de manejo y la propia cuantificación de la incertidumbre. Esta metodología, pertinentemente, posibilita la

comprensión de que una estrategia que parece óptima bajo ciertas circunstancias puede arrojar desenlaces sumamente distintos ante la modificación de factores externos.

La perspectiva territorial clarifica por qué la problemática ecológica requiere un abordaje holístico. Los efectos adversos no se reparten de manera homogénea a través de distintas geografías, sectores productivos ni estratos sociales. Los estudios centrados en la interconexión entre alimentación, agua, territorio y sistemas naturales, efectuados en Europa utilizando un vasto conjunto de más de 900 escenarios simulados del clima y la sociedad, develaron disimilitudes notables a nivel regional y una propagación de consecuencias adversas entre las esferas de la agricultura, los recursos hídricos, la diversidad biológica, los ecosistemas forestales y la ordenación del suelo. Esto demuestra que una política que produce resultados favorables en términos agregados puede generar efectos diferenciados entre territorios. Por ello, la evaluación ambiental integrada debe incorporar escalas espaciales y sectoriales para evitar conclusiones excesivamente generales.

Consecuentemente, la crisis ecológica se puede interpretar como una compleja red de intercambios entre la esfera económica, la esfera social, la tecnología y el medio natural. En este intrincado sistema, las determinaciones tomadas en un ámbito manifiestan resonancias en los otros. Esta perspectiva hace necesario desplazar el paradigma de análisis sustentado únicamente en mediciones discretas por un enfoque metodológico apto para desentrañar vínculos de causalidad, repercusiones colaterales, trayectorias prospectivas, ambigüedades y los desenlaces de las intervenciones políticas. El GEO Resource Book del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente postula la Evaluación Ambiental Integrada como un procedimiento con vocación de futuro y pertinente para la formulación de políticas. Dicho procedimiento aspira a generar y diseminar datos sobre las interdependencias entre el entorno natural y la configuración humana.

En conclusión, esta perspectiva fundamenta conceptualmente las subsiguientes secciones de este capítulo. Si la crisis ambiental ostenta una naturaleza multidimensional, es imperativo que su evaluación emule dicha cualidad, debiendo integrar de forma simultánea los indicadores ambientales, económicos, sociales, climáticos y tecnológicos. El propósito deja de ser únicamente la medición del daño que una acción particular ha causado, y se centra ahora en desentrañar su origen, sus vínculos con otros factores, sus

pronósticos futuros y las rutas alternativas para modificar su trayectoria. Por lo tanto, la Evaluación Ambiental Integrada representa un movimiento desde un análisis fragmentado y predominantemente pasivo hacia una perspectiva holística, dinámica y orientada a la acción. Este tránsito sienta las bases epistemológicas para la subsecuente formulación del constructo de evaluación ambiental integrada y del paradigma de transformación sostenible que se expone en esta obra.

1.2. El concepto de Evaluación Ambiental Integrada

La Evaluación Ambiental Integrada (EAI) puede ser conceptualizada como una perspectiva metodológica que procura abarcar la problemática ambiental contemplando a la vez sus facetas ecológicas, económicas, sociales, tecnológicas e institucionales. A diferencia de un análisis ceñido a la identificación de secuelas individuales, la EAI aspira a trazar conexiones entre las condiciones del entorno, sus génesis, los riesgos latentes y las posibles medidas de control. Cormier y Suter, por su parte, recalcan la perentoria necesidad de un marco que integre variadas categorías de valoración ambiental, posibilitando de esta forma la conexión entre la formulación del problema, las vías de solución y las secuelas subsiguientes.

En contraste con una indagación limitada a la mera enumeración de perjuicios aislados, la EAI persigue el trazado de vínculos entre los factores del hábitat, sus orígenes, los peligros intrínsecos y las pertinentes acciones de mitigación. Cormier y Suter, de igual modo, subrayan la imperiosa urgencia de un constructo que amalgame diversas clasificaciones de evaluación del medio, viabilizando de este modo la articulación entre la definición del dilema, los caminos de solución y las consecuencias subsecuentes. La meta es erigir una imagen más exhaustiva del entramado bajo examen y aminorar las restricciones inherentes a las descomposiciones sectoriales (Lozano et al., 2012).

Una característica fundamental de este enfoque es la integración de diferentes etapas del proceso de evaluación. Cormier y Suter proponen cuatro tipos generales: evaluación de condiciones, evaluación de rutas causales, evaluación predictiva y evaluación de resultados. La primera determina si existe un deterioro ambiental; la segunda busca identificar sus causas y fuentes; la tercera estima los riesgos, beneficios y consecuencias de diferentes alternativas de gestión; y la cuarta verifica si las decisiones adoptadas

consiguieron resolver o reducir el problema. De esta manera, la EAI conecta diagnóstico, explicación, predicción y evaluación posterior.

La distinción entre la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) y la Evaluación Ambiental Integrada (EAI) representa un punto nodal para aprehender la noción. La EIA convencionalmente se enfoca de manera primordial en la identificación y la cuantificación de las repercusiones ecológicas prospectivas inherentes a proyectos, obras o faenas previos a su desarrollo. Propende a prever consecuencias adversas y a estipular disposiciones de prevención, paliación, compensación o salvaguardia. La EAI, por contrapartida, exhibe una esfera de reflexión sustancialmente más vasta, pudiendo compaginar diversas índoles de valoraciones y ponderar no tan solo los efectos de una iniciativa, sino también las génesis, los peligros, las disyuntivas de manejo, los desembolsos, los dividendos y las secuelas subsiguientes. Cormier y Suter subrayan que las diferentes metodologías de análisis ecológico concuerdan en la meta de facilitar datos empíricos orientados a la deliberación, más la dispersión de las mismas podría mermar dicha labor.

Hay que deslindar, también, la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) de la Evaluación Ambiental Estratégica (EAE). Principalmente, la EAE rige políticas, planes, así como programas, abarcando perspectivas ambientales desde el principio de la formulación de directrices estratégicas. Su foco, indudablemente más vasto que la evaluación de obras puntuales, radica en examinar opciones de política y sus potenciales repercusiones ecológicas. No obstante, la EIA aquí propuesta busca una integración aún más exhaustiva, fusionando de golpe variables ambientales, financieras, climáticas, tecnológicas y de índole social. En este sentido, la EAI no sustituye necesariamente a la EIA o a la EAE, sino que puede funcionar como un marco conceptual capaz de articular diferentes instrumentos de evaluación.

La dimensión fundacional de este paradigma es, indudablemente, la integración ambiental. El análisis concomitante de parámetros tales como la emisión de contaminantes, la potabilidad del recurso hídrico, la demanda energética, la idoneidad en el empleo de materias primas, la propensión a la generación de subproductos, la riqueza biológica del ecosistema y la clasificación territorial configura su esencia. No obstante, la mera yuxtaposición de estas métricas dentro de un mismo esquema tabular dista de abarcar la totalidad del concepto integrador. Se vuelve indispensable el discernimiento de

las interconexiones causales mutuas y las probables compensaciones que acarrea cada elemento. Por ejemplo, una novedad tecnológica puede inducir un decremento en la emisión de dióxido de carbono, no obstante, intensificar la demanda de metales de extracción laboriosa o gestar residuos electrónicos. Para sortear inferencias sesgadas, el escrutinio holístico ha de aprehender de manera precisa ambas dinámicas.

La segunda dimensión corresponde a la integración económica. Las decisiones ambientales requieren recursos financieros y generan costos y beneficios que deben ser considerados dentro del proceso de evaluación. Cormier y Suter señalan que las evaluaciones de gestión deben integrar riesgos ambientales y beneficios con costos económicos, preferencias de los actores, restricciones legales y otros elementos relevantes para la decisión. Esto implica que una alternativa ambientalmente favorable no necesariamente será automáticamente la alternativa óptima si resulta económicamente inviable, mientras que una opción de menor costo puede producir consecuencias ambientales superiores. La EAI busca precisamente hacer explícitos estos intercambios.

La dimensión número tres se enfoca en la integración climática. Las modificaciones en las condiciones bajo las cuales operan los sistemas económicos y ambientales resultan del cambio climático, por lo cual la evaluación de proyectos, políticas y tecnologías debe incorporar no solo sus aportaciones a las emisiones, sino también su susceptibilidad a los riesgos climáticos. Una inversión en concreto podría disminuir las emisiones en el futuro cercano; sin embargo, es vulnerable ante sequías, inundaciones, temperaturas extremas u otros peligros a lo largo del tiempo. Por consiguiente, la evaluación integral debe sopesar de forma concurrente la mitigación y la adaptación, amén de la fragilidad inherente de los sistemas económicos y territoriales.

La cuarta dimensión corresponde a la integración tecnológica. La transformación digital puede mejorar la capacidad de recopilar información, monitorear variables ambientales y predecir comportamientos, pero también puede generar nuevas presiones ambientales. La investigación concerniente a la economía circular digital indica que instrumentalidades tales como el Internet de las Cosas, el análisis masivo de datos y otras palancas digitales son capaces de propiciar esquemas circulares; sin embargo, es prudente sopesar las ventajas derivadas ante los efectos materiales energéticos y pecuniarios intrínsecos a la propia digitalización. A raíz de esto, una empresa agroindustrial inteligente actual habrá

de contemplar la tecnología al mismo tiempo como mecanismo de resolución y como potencial germen de problemáticas.

En concordancia con la investigación de Mesa y Pimienta (2024), la integración abarca, adicionalmente, la inserción de la esfera social e institucional. La resolución de una problemática ambiental no se ejecuta únicamente bajo el prisma de índices técnicos; es crucial la consideración de las aptitudes institucionales, las motivaciones de los colectivos implicados, la situación económica de los habitantes, así como la resonancia social que tengan las acciones planteadas. Cormier y Suter enfatizan que las valoraciones de gestión podrían precisar una disección de las predilecciones de las partes interesadas, las imposiciones normativas, los desembolsos y las ganancias, en especial en escenarios donde coexisten diversas metas o las determinaciones generan discordia a nivel social o político. Por ende, la EAI está obligada a admitir que la perdurabilidad se cimienta tanto en la destreza técnica de una opción como en su viabilidad para ser llevada a cabo.

La naturaleza prospectiva es un rasgo característico de la EAI. Más allá de solo detallar las circunstancias actuales, la evaluación ambiental requiere la proyección de futuros escenarios bajo distintas estrategias de manejo. Cormier y Suter postulan que tales evaluaciones predictivas posibilitan cuantificar los efectos de opciones divergentes y ponderar los riesgos, las ventajas y los inconvenientes de índole socioeconómica inherentes a ellas. El GEO Resource Book del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente también sitúa la Evaluación Ambiental Integrada dentro de un proceso orientado a apoyar la formulación de políticas mediante el análisis de las interacciones entre sociedad y ambiente.

La EAI también presenta un carácter dinámico y adaptativo, debido a que las decisiones ambientales no deben considerarse necesariamente definitivas. Una vez implementada una medida, sus resultados deben ser evaluados y comparados con los objetivos establecidos. Cormier y Suter nombran este procedimiento "outcome assessment"; su objetivo es verificar si las acciones cumplieron efectivamente las metas ambientales planteadas. Este ciclo de información facilita la reorientación de las directrices, el perfeccionamiento de las tácticas, y la formulación de novedosos mecanismos de examen. Por lo tanto, se puede diagramar la EAI como una secuencia: diagnóstico, análisis de causa, proyección, determinación, ejecución, valoración y retroalimentación.

Abordando la perspectiva de los métodos, la conjugación exige una armazón compartida, capaz de dar cabida a datos provenientes de variadas ramas del saber. Cormier y Suter identifican tres actividades comunes en los distintos tipos de evaluación: planificación, análisis y síntesis. La planificación determina los objetivos, restricciones, necesidades de información y métodos; el análisis organiza los datos y estudia las relaciones causales; mientras que la síntesis integra la evidencia y genera resultados útiles para la decisión. Esta estructura resulta especialmente importante para el modelo propuesto en este libro, porque permitirá posteriormente incorporar indicadores de circularidad, cambio climático, digitalización, eficiencia económica y resiliencia (Lozano et al., 2012).

Por consiguiente, la Evaluación Ambiental Integrada se puede concebir, para los propósitos de este escrito, como un proceso que es sistémico y multidimensional a la vez, dinámico también y prospectivo, el cual engloba información que es ambiental, económica, climática, social y tecnológica a fin de detectar problemáticas y dilucidar sus raíces, prever situaciones futuras, cotejar dispares opciones de actuación y ponderar consecuentemente sus desenlaces. Así, esta definición expande la noción convencional de evaluación ambiental, dado que mueve el foco desde la mera cuantificación de la repercusión hasta la aprehensión cabal del sistema y la gestación de resoluciones que provoquen mutación. Dicha proposición concuerda enteramente con la exigencia advertida por Cormier y Suter de disponer un marco cohesionador que conecte variadas evaluaciones y auxilie las determinaciones medioambientales.

En esta línea de pensamiento, la EAI provee el armazón conceptual para las secciones que seguirán en este tratado. La economía circular hará posible el examen de la eficiencia y el reciclaje de recursos; el cambio climático hará posible la inclusión de emisiones, peligros y fragilidad; y la transformación digital posibilitará la integración de información, inteligencia artificial, rastreo y aptitud predictiva. El entrelazamiento de estas tres dimensiones no solo superará la lógica de mediciones aisladas, sino que además creará un marco de análisis que podrá discernir no únicamente las consecuencias presentes, sino igualmente las vías para el cambio. Desde este ángulo de visión, la evaluación ambiental cesa de ser meramente un dispositivo de supervisión y se transforma en un instrumento económico y de estrategia para guiar sendas de transición hacia la permanencia.

Figura 1.1. *Evaluación Ambiental Integrada: Marco Multidimensional y Ciclo Metodológico*



Elaboración: Autores

1.3. El triángulo estratégico: circularidad, clima y digitalización

Una evolución hacia un paradigma de desarrollo perdurable implica transgredir la óptica convencional donde el resguardo ecológico, las políticas climáticas y el progreso técnico se tratan como esferas inconexas. A tenor de lo expuesto, la economía circular, la transformación climática y la metamorfosis digital emergen como tres vértices cruciales en incesante enlace dentro de una urdimbre económica y ecológica enlazada. La circularidad apunta a diluir la demanda de recursos vírgenes y también la generación de desperdicios. La contención del calentamiento global se centra en menguar la emisión de gases y fortalecer la resiliencia. Así pues, la digitalización propugna herramientas indispensables para la observación, la optimización y la anticipación de procesos. La amalgama de estas esferas conforma la base de lo que se designa como el tríptico estratégico de la mutación sostenible.

La economía circular representa una transformación sustancial del paradigma económico imperante, fundamentado en la progresión lineal de extraer, producir, consumir y desechar. Su objetivo esencial radica en prolongar la utilidad de productos, partes y materiales en circulación continua durante el mayor tiempo posible, reduciendo paralelamente la demanda de recursos vírgenes y la generación de residuos. Desde una

óptica puramente económica, esto conlleva una recalibración de las fases manufactureras y de apropiación para magnificar la eficiencia en el uso de los activos y mitigar la mengua de sustancias. La circularidad, consecuentemente, no habrá de ser entendida exclusivamente como un método de reciclaje, sino más bien como una cosmogonía que amalgama la mengua, el reuso, el enmiendo, la remanufactura, el recobro y la valorización de materias dentro de los intrincados entramados industriales.

La trascendencia de la circularidad alcanza una significancia acentuada al escudriñar su intrínseca conexión con el cambio climático. De modo directo o mediatamente, una porción sustancial de las emisiones de gases de efecto invernadero se ancla en la adquisición, el procesamiento, el transporte y el aprovechamiento de materias primas y energía. Mediante la reducción del requerimiento de materiales vírgenes, la extensión de la vida útil de los productos y la revalorización de sus constituyentes, es factible menguar considerables presiones emanadas de las labores productivas. No obstante, la conexión entre la circularidad y el clima no es intrínsecamente favorable. Piscicelli (2023) destaca que, si bien las aproximaciones digitales y circulares ofrecen ventajas ambientales, también pueden dar lugar a repercusiones económicas, sociales y ecológicas suplementarias cuya evaluación sistemática resulta indispensable.

El segundo pilar del triángulo constituye la alteración climática. Este fenómeno se concibe no meramente como desafío medioambiental, sino adicionalmente como factor económico que altera los parámetros productivos, de inversión y de consumo. Las ondulaciones térmicas al alza, las alteraciones en los patrones de lluvia, los sucesos de naturaleza extrema y otros desequilibrios ecológicos están en capacidad de minar la productividad, dañar las construcciones, sacudir los mercados y acortar la disponibilidad de bienes. Simultáneamente, las medidas de mitigación y adaptación requieren gastos y transformaciones tecnológicas. De ahí que el fenómeno del cambio climático precise ser asimilado en la revisión de las estructuras económicas y operativas. Esto implica ponderar, por un lado, las emisiones producidas; por otro, la susceptibilidad y la fragilidad ante las contingencias climáticas.

La tercera dimensión se relaciona con la transformación digital; abarcaría tecnologías tales como Internet de las Cosas, inteligencia artificial, big data, la computación en la nube, blockchain, sensores y sistemas de análisis avanzado. Tales herramientas son capaces de aumentar significativamente la capacidad de organizaciones y gobiernos para

recolectar información acerca del funcionamiento de los sistemas ambientales, así como también los económicos. Los sensores podrían registrar consumos de energía y agua en tiempo real; los sistemas de análisis podrían identificar patrones de desperdicio; y los modelos predictivos podrían anticipar fallas, emisiones o la generación de residuos. A través de este modo, la digitalización podría ser una infraestructura de información para la transición circular y climática.

La vinculación entre la digitalización y la economía circular se presenta excepcionalmente pertinente. Las innovaciones digitales capacitan para optimizar la trazabilidad de los recursos materiales, hacer más ágil la monitorización del ciclo vital de las mercancías y entrelazar cadenas de suministro que incluyen a productores, elaboradores, compradores finales y entidades de gestión de desechos. Por dar un ejemplo, un esquema digital de seguimiento exhaustivo podría ofrecer datos detallados acerca de la procedencia de un compuesto, sus constituyentes intrínsecos, su uso presente, opciones de restauración y la viabilidad de su reaprovechamiento. Tal acopio de conocimiento disminuiría las disparidades de información existentes y, de esta manera, podría dinamizar el surgimiento de mercados paralelos para materias primas. Un estudio de Chi et al. (2023) apunta justamente a diversas tecnologías digitales como catalizadores probables para esquemas de economía circular, pero, no obstante, subraya la necesidad de examinar sus repercusiones considerando asimismo los efectos derivados no previstos.

La digitalización, igualmente, ostenta un rol directo en el manejo del clima. La mera existencia de volúmenes colosales de datos abre la puerta a un escrutinio más fino de las emisiones, facilita el señalamiento de focos de consumo energético y propicia el ensamblaje de esquemas predictivos climáticos y ambientales. Imaginemos una corporación, para ilustrar, donde los sensores vinculados registran el gasto eléctrico inherente a cada etapa de producción y, simultáneamente, señalan cualquier divergencia frente a los parámetros anticipados. Sustentados en estos datos, algoritmos de inteligencia artificial son capaces de descubrir fisuras de eficiencia y pronosticar tendencias futuras. Así, el ámbito digital, por consiguiente, trasciende el mero registro de las repercusiones ambientales para amplificar la facultad de previsión de las entidades.

Empero, la digitalización guarda una doble faz con la sostenibilidad. El avance digital, si bien mitiga ciertos embates a través de la optimización operativa, la supresión de la labor física y la agilización de recursos, forzosamente demanda artefactos, instalaciones de

cómputo, canales de comunicación, potencias eléctricas y elementos primarios. Consecuentemente, una herramienta aparentemente ágil en su operación puede desatar repercusiones ecológicas en otras fases de su trayectoria. Piscicelli (2023) subraya puntualmente la imperiosa urgencia de mensurar las secuelas de la digitalización y refrenar la creencia de que toda novedad digital promueve intrínsecamente alcances sostenibles.

La sinergia entre economía circular y digitalización gesta efectos subsecuentes insospechados. Un portal digital diseñado para potenciar la remanufactura de artículos tiene la facultad de mitigar la demanda de manufactura inédita; sin embargo, simultáneamente, puede atizar un consumo más acendrado, por cuenta de una merma en los costes de acceso o tenencia. En semejanza, una innovación tecnológica que achique el consumo energético por unidad elaborada resulta en una elevación del consumo global si el abatimiento de costos alienta una expansión conspicua de la producción. Este escenario está íntimamente correlacionado con el efecto rebote, ilustrando que un avance en la eficiencia singular no garantiza, en forma inherente, una reducción análoga en la huella ambiental colectiva.

El cambio climático, en sí, tiene la facultad de alterar las precondiciones de operación de las metodologías de economía circular y de digitalización. Las redes de abastecimiento son susceptibles de sufrir quebrantos a causa de desastres climáticos sin precedentes, a la par que la privación hídrica, energética o de ciertas materias primas puede disparar los precios de fabricación. Desde esta perspectiva, la circularidad se posiciona como un elemento para mermar la dependencia de materiales vírgenes y robustecer la seguridad de recursos en las entidades. Simultáneamente, las plataformas tecnológicas de índole digital tienen la capacidad de suministrar datos cruciales para detectar debilidades, ramificar el abanico de proveedores, mejorar la eficiencia de los inventarios y prever posibles contratiempos. Por consiguiente, la conjugación armónica de estas tres esferas posibilita la edificación de competencias sólidas en materia de resiliencia tanto económica como medioambiental.

El enfoque integrado también permite observar que las tres dimensiones persiguen objetivos parcialmente coincidentes, pero mediante mecanismos diferentes. La economía circular actúa principalmente sobre los flujos de materiales y recursos; la política climática se concentra en las emisiones, riesgos y vulnerabilidades climáticas; y la

transformación digital actúa principalmente sobre los flujos de información, coordinación y capacidad de decisión. Esta diferenciación, fundamentalmente, evidencia que la digitalización no reemplaza a la circularidad ni a la acción climática de forma inherente. Por el contrario, pudiera ofrecer los instrumentos propicios para optimizarlas, cuantificarlas y preverlas con mayor eficacia.

En el ámbito de la evaluación ambiental integral, el concepto estratégico triangular postula que una tecnología o enfoque empresarial jamás debiera ser valorado a través de una única perspectiva. Una determinada iniciativa puede ser catalogada como circular por su disminución de desechos, más a pesar de ello, podría generar emisiones incrementadas a causa del alza en la demanda energética. Similarmente, una tecnología resulta eficaz al aminorar emisiones directas, pero al mismo tiempo puede potenciar la necesidad de materiales escasos o el surgimiento de residuos electrónicos. La evaluación integrada, entonces, debe confrontar estos resultados para dilucidar el equilibrio ambiental, económico y tecnológico subyacente en cada opción. Tal principio, lógicamente, representa un avance significativo en relación con los esquemas de evaluación que empleaban métricas ambientales segmentadas.

La integración tridimensional requiere encarar escalas temporales desiguales. Pronto la productividad se derivará de inversiones digitales, a diferencia de los beneficios climáticos de reducir emisiones, que se toman su tiempo. Por igual, una estrategia circular exige egresos iniciales en sistemas de reciclaje para así después ahorrar recursos. Por lo tanto, cualquier evaluación apta debe considerar gastos inmediatos junto a premios futuros y que no solamente prevalezcan los beneficios a corto plazo. La visión prospectiva de la evaluación ambiental unida se demuestra esencial para tal propósito.

Conceptualizadamente, la tríada estratégica se materializa en tres nodos interconectados: la circularidad de los recursos, la gestión climática y la mutación digital. Inicialmente, la digitalización faculta la mejora en la rastreabilidad, el reuso y la repatriación de materiales. Subsiguientemente, esta herramienta otorga capacidades para evaluar, prever y manejar tanto las emanaciones como los peligros climáticos. En el tercero, la economía circular contribuye a disminuir las presiones materiales y energéticas asociadas con la producción tecnológica. El resultado esperado es un sistema en el que las tres dimensiones se refuercen mutuamente, aunque siempre bajo un proceso de evaluación que permita identificar posibles contradicciones y efectos no deseados (Intriago, 2024).

Desde un lente económico, esta conjunción se visualiza como una táctica para potenciar la productividad ambiental inherente a los elementos de producción. La economía circular persigue aumentar la plusvalía económica al tiempo que disminuye la necesidad de recursos vírgenes; la actividad climática procura menguar las emisiones asociadas a la generación de riqueza; y la digitalización busca perfeccionar el flujo informativo y la coordinación de operaciones. Conjuntamente, estos enfoques poseen la capacidad de aminorar costos, disipar riesgos, incrementar la eficiencia y abrir paso a nuevos modelos comerciales. No obstante, la realización tangible de estas ventajas está supeditada a variables como el capital necesario, las aptitudes institucionales, los estímulos pecuniarios y el armazón tecnológico particular de cada entidad.

En consecuencia, el triángulo estratégico propuesto en este capítulo debe entenderse como un marco de integración y no como una relación automáticamente virtuosa. La economía circular puede contribuir a la mitigación climática, pero no todas las estrategias circulares tienen necesariamente el mismo desempeño climático. La digitalización puede facilitar la circularidad y la gestión climática, pero también puede incrementar el consumo energético y material. El cambio climático puede estimular la innovación y la transformación productiva, pero también generar pérdidas económicas y restricciones sobre los recursos. La Evaluación Ambiental Integrada debe precisamente identificar estas interacciones, cuantificarlas cuando sea posible y determinar bajo qué condiciones una estrategia produce un resultado netamente favorable.

Por ello, el enfoque planteado en esta obra propone avanzar desde una visión de “circularidad + clima + digitalización” como tres políticas independientes hacia una visión de “circularidad $\times$ clima $\times$ digitalización” como sistema integrado. El signo de multiplicación representa la existencia de interacciones y dependencias entre las dimensiones, donde el desempeño de una puede modificar el resultado de las demás. Esta perspectiva constituye la base para desarrollar posteriormente indicadores específicos de circularidad inteligente, huella ambiental dinámica e inteligencia ambiental. La integración de dichos componentes permitirá evaluar no solamente cuánto impacto ambiental genera una organización o territorio, sino también qué capacidad posee para reducir recursos, disminuir emisiones, utilizar tecnologías sostenibles y anticipar riesgos ambientales.

Finalmente, el triángulo estratégico establece una transición conceptual fundamental para el modelo desarrollado en este libro: pasar de la eficiencia aislada a la transformación sistémica. La economía circular proporciona el enfoque sobre los recursos; el cambio climático introduce la dimensión de riesgo, emisiones y resiliencia; y la transformación digital proporciona infraestructura de información, monitoreo y predicción. La articulación de estas tres dimensiones permite construir una evaluación ambiental capaz de acompañar las decisiones económicas desde el diagnóstico hasta la anticipación. Sobre esta base se desarrollará el siguiente apartado, dedicado a la paradoja de la transformación sostenible, donde se analizará por qué una tecnología que mejora la eficiencia ambiental puede, bajo determinadas circunstancias, producir nuevos impactos o incluso aumentar la presión ambiental total.

1.4. La paradoja de la transformación sostenible

La metamorfosis sustentable asume que los avances tecnológicos, estructurales y financieros sí influyen positivamente en menguar las cargas que se ciernen sobre el entorno. No obstante, esta correlación, de ninguna manera, presenta una linealidad asegurada ni asegura que una optimización en la eficacia culmine en un alivio simétrico de la huella ecológica global. Un avance tecnológico, capaz de menoscabar la extracción de insumos por unidad de mercancía, paralelamente puede fomentar un auge en la manufactura, el disfrute o el uso de nuevos insumos. Esta disyuntiva se erige como uno de los atributos primordiales de la antedicha paradoja de la transformación sustentable. En consecuencia, el escrutinio ecológico debe contemplar no solo las ventajas inmediatas de un ingenio, sino sus potenciales secuelas colaterales y entrelazadas.

Desde el punto de vista económico, se puede exponer la paradoja al inicio mediante la interconexión entre la eficacia, los gastos y el apetito del mercado. Ante una innovación que facilite la fabricación de un producto con menor energía, insumos o duración, es posible que el coste por unidad baje. Si las corporaciones transmiten una fracción de este decrecimiento a sus tarifas, los compradores tal vez eleven su apetito y las empresas se vean impulsadas a incrementar su manufactura. Por consiguiente, el mermar de recursos por unidad podría quedar atenuado, o incluso ser eclipsado, por la subida del volumen de fabricación. De ahí que la eficacia técnica no debería asociarse de forma automática con la eficacia ambiental en conjunto.

El fenómeno discutido aquí, frecuentemente nombrado como el efecto rebote, constituye una noción crucial para discernir las limitaciones intrínsecas a las metodologías que priorizan la eficiencia. Cuando un avance tecnológico depara una disminución anticipada en la demanda de recursos, una porción de ese ahorro recién descubierto puede catalizar conductas que, ineludiblemente, reavivan el consumo. Desde una perspectiva económica, un abatimiento en el costo efectivo inherente a la explotación de un recurso es susceptible de alterar los estímulos que guían a los actores, resultando así en un incremento de su empleo. Consecuentemente, el resultado ambiental postrero es un reflejo no solo de la destreza tecnológica alcanzada, sino, de forma igualmente significativa, de las reacciones de aquellos que producen, consumen y de los entramados de mercado que operan.

La digitalización representa un paradigma contemporáneo fundamental de esta antinomia. Con sus sensores, sistemas automatizados, inteligencia artificial y analíticas, la tecnología digital posibilita mejoras significativas en la productividad. De hecho, un sistema intrincado podría menguar el derroche de insumos, afinar itinerarios logísticos, prever anomalías e incluso moderar la demanda energética. No obstante, no debemos obviar que estas mismas tecnologías demandan artefactos electrónicos, nidos de datos, tramas de comunicación, cimentaciones informáticas y considerable energía. De igual modo, García (2016) recalca que las herramientas digitales facilitan esquemas de economía circular; sin embargo, sus repercusiones ecológicas reclaman un escrutinio exhaustivo de sus secuelas colaterales.

La primera dimensión de la paradoja puede observarse cuando la tecnología reduce directamente un impacto ambiental. Por ejemplo, un sistema de inteligencia artificial puede optimizar el funcionamiento de una maquinaria industrial y reducir el consumo de electricidad por unidad producida. Desde una perspectiva sesgada, el resultado se vislumbra manifiestamente ventajoso: una disminución en el consumo de energía, un abatimiento en el costo de operación y, en potencia, una merma en las emisiones. Sin embargo, acaece que, si la rebaja en los costos incrementa la producción total, la corporación podría rematar empleando una cantidad discreta de energía pareja o inclusive superando el estado primordial. La valoración conjunta debería abarcar ambos alcances: la tenacidad medioambiental por unidad y la resonancia medioambiental absoluta.

Un segundo caso aparece cuando una tecnología genera sustitución de materiales o actividades. La digitalización permite que algunos bienes tangibles sean sustituidos por

servicios digitales. De esta manera, potencialmente sería posible reducir el uso de papel, transporte y ciertos bienes físicos. No obstante, la infraestructura necesaria para ofrecer estos servicios requiere equipos, servidores, redes y minerales. Del mismo modo, los dispositivos digitales podrían presentar períodos de reemplazo rápidos debido a la obsolescencia tecnológica. Por ende, sustituir un bien físico por uno digital no tendría que considerarse obligatoriamente como una reducción total del impacto ambiental; es vital examinar la totalidad de su ciclo de vida.

La perspectiva del ciclo de vida es primordial para señalar estas incongruencias. Un análisis centrado únicamente en la etapa de uso mostraría resultados ventajosos, mientras que uno que incluyera la obtención de materias primas, la producción, el transporte, el uso y el desecho final podría revelar efectos adicionales. En referencia a las tecnologías digitales, esta consideración es especialmente crucial dada la dependencia de componentes y materiales electrónicos. García (2016) señala que el análisis de la economía circular digital debe tener muy en cuenta las influencias de las tecnologías en varias dimensiones y fases, además de no dar por supuesto que la digitalización es siempre beneficiosa.

La paradoja también pudiera surgir en la correlación entre la expansión económica y la tensión ecológica. Una economía con posibilidades de mejorar su rendimiento energético y de materiales pudiera no llegar a mermar su tensión ambiental inherente si el incremento en la producción supera las eficiencias ganadas. Esto genera una disparidad primordial entre la disociación relativa y la disociación absoluta. En la primera circunstancia, merma el efecto ecológico por cada unidad generada; empero, en la segunda, decae el efecto ecológico total pese al auge económico. Aun para una valoración ecológica integral, semejante divergencia deviene crucial, pues permitirá dilucidar si una mutación tecnológica tan solo resulta en avances de intensidad o si verdaderamente propicia una merma total de las presiones ecológicas.

La transición sostenible genera paradojas con la ampliación de la demanda nueva. Tecnologías al principio hechas para mejorar la eficiencia pueden crear mercado y consumo de patrones nuevos. La expansión de automóviles eléctricos es un ejemplo: sí, reduce emisiones en fase de uso, pero también, a la vez, la demanda de baterías, minerales y electricidad incrementa. Parecidamente, la expansión de servicios de inteligencia artificial basada en la productividad puede generar nuevas oportunidades económicas,

pero también aumentará la demanda de infraestructuras computacionales. El análisis completo debe evaluar cadenas de efectos y solo el impacto directo de la tecnología, no limitarse.

Otra faceta destacable recae en que la innovación tecnológica, de hecho, es capaz de forjar nuevas dependencias de índole material. Así, la migración hacia tecnologías digitales y de bajas emisiones carbónicas, imperativamente, demandas minerales y componentes específicos cuya extracción, a su vez, resulta perjudicial para ecosistemas y colectividades. Consecuentemente, una estrategia meticulosamente formulada para aminorar las emisiones de carbono, sin más, puede desplazar una fracción de la presión ambiental hacia esferas divergentes, tales como la utilización del suelo, del agua o bien la actividad minera. Esta situación pone de manifiesto inequívocamente que la sustentabilidad, sin lugar a dudas, elude la evaluación a través de unívoco índice, dígase las emisiones de CO₂, pues una merma carbónica podría simultáneamente acontecer con un incremento de distintas manifestaciones de presión ambiental.

La paradoja también tiene una dimensión temporal. Una inversión tecnológica, aunque demanda un desembolso inicial considerable de recursos y energía para su manufactura e implementación, podría generar posteriormente ahorros durante amplios períodos de tiempo. Si se valora únicamente en su fase inicial, la tecnología puede ser considerada perjudicial desde un punto de vista ecológico. Por otro lado, si solamente se analiza su etapa operativa, sus beneficios pueden ser magnificados. Así, una evaluación ambiental completa debería, por consiguiente, incluir plazos temporales prudentes y considerar la acumulación neta de efectos y beneficios a lo largo del ciclo de vida de la tecnología (Leal, 2014).

Desde un prisma corporativo, esta dicotomía demuestra que la viabilidad económica y la preservación ecológica no se integran intrínsecamente por sí solas. Una entidad corporativa, al implementar una optimización de costos a través de una innovación puntera, está en posibilidad de reasignar los capitales previamente comprometidos para impulsar el crecimiento de su alcance operativo. Dicha estrategia tiene el potencial de consolidar su presencia en el ámbito mercantil; no obstante, esto conlleva consigo un incremento del peso sobre el medio ambiente a escala global. Por ende, las resoluciones empresariales con una perspectiva ecológica integral deben integrar, de manera imperiosa, marcos regulatorios y metas ambientales predefinidas, salvaguardando así que

los emprendimientos dinamizados por el progreso tecnológico no propendan exclusivamente a cultivar patrones de consumo que deterioren los sustratos vitales. Por ende, las decisiones empresariales ecoeficientes deberían incluir, indefectiblemente, acuerdos y fines ambientales precisos, para que las economías habilitadas por una tecnología no solo se enfoquen en prácticas que generen un consumo excesivo de recursos. El desafío consiste en convertir las ganancias de eficiencia en reducciones reales de impactos.

El concepto de economía circular puede contribuir a reducir algunas de estas paradojas, siempre que se diseñe más allá del simple reciclaje. La reutilización, la reparación, la remanufactura y la vida útil más larga son capaces de reducir la exigencia de fabricar elementos nuevos; además, limitan ciertos efectos de rebote que ocurren. Mas, aun una propuesta circular es susceptible de provocar repercusiones extra si incrementa el pedido de desplazamiento, de energía o de equipamiento para recuperación. Resulta entonces indispensable que la circularidad sea juzgada a través de métricas que tengan en cuenta tanto la obtención de recursos como los sacrificios ecológicos inmersos en los procedimientos empleados para lograrlos.

Dentro de este marco, la Evaluación Ambiental Integrada emerge como un instrumento idóneo para desentrañar la compleja paradoja inherente a la transformación sostenible. Más allá de la mera interrogante sobre si una tecnología "atenúa el impacto ambiental", un análisis cabal demanda un examen pormenorizado, casi quirúrgico. Sería imperativo cuestionarse exhaustivamente: la reducción de qué impacto se logra, ¿en qué segmento exacto del ciclo vital es efectiva dicha mitigación, y qué requerimientos de insumos adicionales demanda su puesta en práctica? A su vez, ¿qué tipos de comportamientos promueve y qué desatenciones colaterales surgen de su empleo? Más aún, ¿cuáles serían las ramificaciones de una adopción masiva y, para concluir, ¿cuál es el cómputo global de su huella ecológica? Esta agudeza conceptual halla perfecta resonancia con el abordaje abarcador que presentan Cormier y Suter, quienes enfatizan la necesidad crucial de considerar el estado del entorno, los intrincados nexos causales, los modelos pronósticos y los efectos demostrables que devienen de las metodologías de administración aplicadas.

La paradoja puede representarse, entonces, mediante una cadena de relaciones: innovación tecnológica → aumento de eficiencia → reducción del costo unitario → modificación del comportamiento → aumento de demanda → expansión de la producción

→ nuevos impactos ambientales. Sin embargo, esta cadena no necesariamente termina en un aumento del impacto. Si existen políticas ambientales, límites de consumo, estándares de eficiencia, incentivos adecuados y modelos circulares, las ganancias de productividad pueden convertirse en reducciones efectivas del impacto ambiental. Por ello, el resultado final depende de las condiciones institucionales, económicas y tecnológicas que acompañan a la innovación.

Desde una óptica de política económica, es importante comprender que la mera innovación no asegura la perdurabilidad. Las estructuras institucionales deben idear maneras para que los avances tecnológicos se alineen con metas ambientales comprobables. Instrumentos como los gravámenes ecológicos, directrices de rendimiento, modelos de responsabilidad ampliada del fabricante, estímulos a la compostura y al reaprovechamiento, nichos de mercado para materiales recuperados y normativas para desechos electrónicos ilustran herramientas capaces de influir en las motivaciones de los actores. Así, las optimizaciones en la eficacia operativa serán respaldadas por directrices que evitan que la frugalidad alcanzada devenga en una mera expansión del gasto.

La paradoja asume una importancia aún mayor al incorporar el cambio climático. Una tecnología determinada podría mitigar las emisiones de una actividad específica, mas podría exacerbar otros efectos ambientales, los cuales comprometen la resiliencia del sistema. Por ejemplo, una política de electrificación podía favorecer la disminución de emisiones directas, pero implicar requerimientos de nuevas infraestructuras y materiales. En consecuencia, la transición climática habría de evaluarse considerando de forma simultánea emisiones, energía, materiales, agua, desechos y vulnerabilidad. El enfoque integrado previene que la política climática se transforme en una táctica de reducción de carbono desacoplada de las demás dimensiones ambientales (Leal, 2014).

En consecuencia, la transformación sostenible debe evaluarse a partir del impacto ambiental neto y no exclusivamente de la eficiencia parcial. Una tecnología habrá de reputarse como ambientalmente bondadosa si los beneficios ecológicos que arroje a lo largo de su vida superan de manera comprobable las repercusiones adicionales, las cuales surgen de manera directa e indirecta. Es imperativo entonces fijar confines, métricas y pautas de adicionalidad ambiental. Siguiendo esta perspectiva, la aminoración de

emisiones o de la demanda de recursos representa una consecuencia favorable, si bien no bastaría para catalogar una invención como sostenible.

Para el modelo propuesto en esta obra, esta consideración tiene una implicación metodológica importante: los indicadores de circularidad, cambio climático y digitalización no pueden agregarse sin analizar sus interacciones. Una mejora en el Índice de Inteligencia Ambiental, por ejemplo, no debería aumentar automáticamente el Índice Integrado de Transición Sostenible si dicha mejora implica un incremento desproporcionado del consumo energético o de los residuos tecnológicos. De igual manera, un incremento de la circularidad no debería considerarse completamente positivo si requiere procesos con una huella ambiental superior a la de los materiales que pretende recuperar.

En resumen, la paradoja de la transformación sostenible ilustra que el vínculo entre innovación y sostenibilidad resulta ser condicional y varía con el contexto. La tecnología pareciera ser un instrumento para atenuar efectos negativos, optimizar la eficiencia de recursos y potenciar la resiliencia, pero además puede provocar nuevas demandas, consecuencias indirectas e inversiones de afectaciones. En consecuencia, el análisis ambiental integral debería trascender la idea simplista de "tecnología es la respuesta" y abrazar una visión que considere la totalidad del ciclo vital, las interconexiones globales, las distintas situaciones posibles y el balance ambiental absoluto.

Figura 1.2. La Paradoja de la Transformación Sostenible: Efecto Rebote y Ciclo de Vida



Elaboración: Autores

1.5. Hacia un nuevo paradigma de evaluación ambiental

La metamorfosis de las crisis ecológicas reclama una reconfiguración profunda en la recolección, estructura y aprehensión de los datos que guían las elecciones. Durante décadas, el análisis medioambiental ha dependido de indicadores específicos, formulados para medir factores como emisiones atmosféricas, calidad hídrica, volumen de residuos o consumo energético. Aunque estas metodologías todavía poseen mérito, muestran limitaciones cuando se aplican de forma aislada, puesto que cada indicador solo revela una dimensión del funcionamiento de un sistema socioecológico intrincado. El desafío actual reside en ir más allá de la valoración fundamentada en mediciones individuales, transitando hacia un esquema capaz de develar los nexos que las unen.

Un indicador ambiental deviene más útil cuando se comprende el contexto del sistema económico y social del que emana. La demanda de energía, por caso, no emana meramente de aspectos técnicos de una instalación, sino también de la actividad productiva, los costos energéticos, las herramientas innovativas a disposición, las circunstancias atmosféricas y las determinaciones corporativas. Aún más, la producción de desechos se vincula con las maneras productivas, el esquema de los artículos, las conductas del consumidor y la presencia de mercados para materia reciclada. Por consiguiente, el análisis ambiental exigirá la contextualización de los indicadores y la comprensión de las relaciones que cimientan su curso.

La Evaluación Ambiental Integrada, de acuerdo con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), se presenta como una herramienta proactiva destinada a enriquecer la elaboración de políticas con datos esenciales. Su objetivo primordial reside en examinar las intrincadas interdependencias que tejen la sociedad con el entramado ambiental. A través de su metodología, se integran diversas facetas: desde el estado intrínseco de las condiciones ambientales y los motores subyacentes que las impulsan, hasta las tensiones y presiones que el entorno sufre. Todo esto, para comprender los efectos resultantes y las reacciones subsiguientes, tanto a nivel social como institucional. La singularidad de esta arquitectura de análisis emana de su capacidad para forjar vínculos directos, cotejando una variable ambiental específica con los mecanismos económicos y sociales que, en última instancia, dictan su trayectoria (Dunlap y Van Liere, 2008).

Una de las mutaciones cruciales implica trascender métricas aisladas a métricas integrales. Una métrica aislada emula una pregunta precisa: qué cantidad exacta de CO₂ se expulsa, la cuantificación del agua absorbida o el peso de los desechos generados. Por contraste, una métrica integral aspira a plasmar un vínculo entre factores diversos. Con fines ilustrativos, la densidad de carbón equipara las emisiones a la dinámica productiva monetaria; la eficiencia en insumos de materia prima enlaza el valor generado con la acumulación de elementos; y un criterio de circularidad podría consolidar la reincorporación, la reutilización, la durabilidad y el aprovechamiento de activos. Este tránsito faculta la apreciación del rendimiento ecológico con arreglo a la actividad económica que lo genera.

El levantamiento de indicadores sistémicos exige la predeterminación de las interrelaciones de interés para el foco investigado. Como ejemplo, dentro de una compañía manufacturera, torna pertinente la vinculación entre la producción, el consumo energético, la empleabilidad de las materias primas, la generación de desechos, los efluvios y los gastos operativos. Para un municipio, los parámetros abarcarían la producción de residuos, el gasto hídrico, la locomoción, el estado de la atmósfera, las infraestructuras, la demografía y la asignación presupuestaria estatal. La elección de las variables debe obedecer a un armazón conceptual y no solamente a la accesibilidad de la información recabada. De otra forma, acecha el peligro de erigir métricas con gran destreza estadística, pero con cimientos conceptuales precarios.

Una metamorfosis crucial radica en el desplazamiento desde una apreciación inmóvil hacia un escrutinio movable. Una valoración quieta, por su parte, detalla el panorama ecológico en un instante puntual. No obstante, un examen presto de las circunstancias se dedica a dilucidar la progresión de las magnitudes con el transcurrir temporal. Dicha disimilitud se torna primordial, ya que un aparato puede ostentar en el presente una conducta ecológica satisfactoria y, no obstante, situarse en un curso improductivo. Del mismo modo, una organización con indicadores ambientales deficientes puede estar experimentando una mejora consistente como consecuencia de inversiones recientes en eficiencia, circularidad o tecnología.

La perspectiva evolutiva facilita el análisis de rumbos, ciclos, mutaciones estructurales y giros cruciales. Una disminución de emisiones año a año podrá ser consecuencia de un avance tecnológico duradero o meramente de una declinación transitoria de la

producción. De forma simultánea, un auge en la marca de reutilización se puede relacionar con una pauta fija o con una situación anómala. La revisión temporal permite diferenciar entre fluctuaciones coyunturales y mutaciones fundamentales, aportando una base más firme para la delineación de principios y estrategias empresariales.

Igualmente, el horizonte temporal es esencial para el análisis de las directrices medioambientales. Una acción podría acarrear desembolsos iniciales considerables y retornos subsiguientes, similares a las inversiones en fuentes limpias, sistemas de gestión de desechos o plataformas de vigilancia digitales. Si la evaluación se limita al período inmediatamente posterior a la inversión, puede subestimar sus beneficios. Por el contrario, una política puede generar resultados positivos en el corto plazo, pero producir efectos negativos posteriormente. El análisis dinámico permite incorporar estos desfases temporales dentro de la evaluación (Dunlap y Van Liere, 2008).

Un segundo cambio conceptual conlleva un desplazamiento de la evaluación retrospectiva hacia la perspectiva prospectiva. Cuando la evaluación retrospectiva escudriña los sucesos pasados y sus raíces profundas, la prospectiva concentra su atención en anticipar resultados factibles a partir de supuestos específicos. Cormier y Suter resaltan el valor crucial de la estimación predictiva para cuantificar los riesgos, beneficios y repercusiones asociados a diversas metodologías de intervención. Tal pericia deviene indispensable en contextos caracterizados por la imprevisibilidad, ejemplificados por los cambios ambientales, la disponibilidad venidera de recursos o los avances en la tecnología.

La valoración prospectiva demanda una interacción con escenarios. Lejos de presuponer la unicidad de un acontecer venidero, es factible urdir distintas trayectorias en función de las determinaciones asumidas. A título ilustrativo, un dispositivo productivo pudiese examinar un escenario de persistencia, otro cimentado en la economía circular, un tercero enfocado en la metamorfosis digital, y finalmente, uno que amalgame circularidad, digitalización y atenuación climática. Semejante comparación facilitaría la inferencia sobre qué senda depara unos resultados ambientales y económicos superiores bajo premisas específicas. Esta metodología será especialmente relevante para el modelo de escenarios que se desarrollará posteriormente en el libro.

La prospectiva tiene la capacidad de alterar la función de los indicadores. En un esquema tradicionalmente concebido, el indicador opera en gran medida para reflejar la condición

presente. Sin embargo, dentro de un sistema de prospectiva, no solo mide lo actual, sino que puede evolucionar a una variable para el monitoreo de escenarios. Un caso podría ser cómo el consumo energético se proyecta mediante el uso de distintas tecnologías; de igual manera, la generación de desechos puede ser calculada con arreglo a diferentes paradigmas de producción; y las emisiones, por su parte, podrían ser determinadas a partir de diversas velocidades de expansión. De esta forma, los indicadores se despojan de ser meros aparatos de diagnóstico, transformándose en artefactos de predicción.

La integración de datos históricos con modelos predictivos abre nuevas posibilidades para la evaluación ambiental. Los expedientes empresariales, sensores IoT, datos climáticos, tomas satelitales y registros económicos se unen para erigir modelos que desentrañen pautas y anticipen comportamientos. La metamorfosis digital adopta así un rol metodológico: no solo optimiza actividades, sino que expande la visión y presciencia de los sistemas ecológicos. Dicha perspectiva resuena con la concepción de un examen ecológico que integre más adelante IA y análisis prospectivo.

No obstante, un cúmulo de información no asegura de suyo una evaluación más depurada. La información debe ser relevante, comparable, consistente y de calidad suficiente para sustentar las decisiones. La discrepancia en los métodos de cálculo, aunque sea para el mismo indicador, puede obstaculizar comparaciones. Sumado a ello, la falta de antecedentes, datos o información territorial es fuente de imprecisiones modeladas. Por consiguiente, el nuevo enfoque debe considerar la información en cuanto a su suficiencia, la fiabilidad que representa, la frecuencia de su actualización y la posibilidad de cotejarla.

De acuerdo con Dolnicar et al. (2025), La integración también requiere reconocer explícitamente la incertidumbre. Los modelos ambientales carecen de la capacidad de predecir completamente el comportamiento futuro, puesto que se apoyan en variables económicas, tecnológicas, climáticas y sociales. Estas variables se encuentran en constante cambio, por lo que resulta difícil realizar predicciones con precisión. El GEO Resource Book recalca que se deben integrar análisis de escenarios y considerar las conexiones entre los aspectos naturales y humanos. Esto resulta fundamental para desarrollar una adecuada Evaluación Ambiental Integrada y no limitarse a una evaluación convencional. En consecuencia, un modelo robusto no debería presentar una única predicción como certeza, sino trabajar con rangos, probabilidades o escenarios alternativos cuando sea apropiado.

Otro elemento del nuevo paradigma es la integración de escalas. Los problemas ambientales pueden manifestarse simultáneamente a nivel empresarial, municipal, nacional y global. Una organización puede disminuir desechos internamente. Sin embargo, puede transferir ciertos efectos adversos a sus proveedores; un ayuntamiento puede optimizar su manejo de residuos. No obstante, una porción de los materiales recuperados acaba procesada en otra demarcación. Consecuentemente, el análisis deberá tener en cuenta los límites del sistema. Así se evitará que una aparente disminución de las repercusiones sea un mero producto de su reubicación geográfica o sectorial.

La incorporación de la perspectiva de ciclo de vida contribuye a resolver este problema. Centrar la evaluación enteramente en la fase de producción, sin más, deja de lado repercusiones surgidas durante la extracción de insumos básicos, su traslado, el uso y, ulteriormente, su descarte. La perspectiva de ciclo de vida permite ampliar la frontera analítica y determinar dónde se concentran realmente los impactos. Esto resulta de particular trascendencia al sopesar tecnologías digitales y estrategias circulares. Ello obedece a que sus potenciales beneficios, evidenciados durante la etapa de aprovechamiento, pudieran ir acompañados de repercusiones sustanciales, ya sea en el proceso de manufactura o en la fase de descarte final de los productos.

La nueva concepción altera la conexión entre la medición y la toma de decisiones. Tradicionalmente, la evaluación ambiental solía desembocar en la mera exhibición de indicadores y hallazgos. Una valoración integral, en contraste, debe ir un tramo más allá y transformar las pruebas recabadas en proposiciones de acciones correctivas. Cormier y Suter sugieren entrelazar el escrutinio de las circunstancias y los orígenes de los problemas ambientales con el escrutinio de diversas tácticas de manejo, para luego verificar las consecuencias. Por consiguiente, la esfera de la evaluación se acopla sin más preámbulos a la esfera de la política gubernamental, la proyección corporativa y el despliegue de capitales.

Este giro resulta especialmente trascendente en el ámbito de la economía ambiental, dado que las determinaciones precisan sopesar los beneficios medioambientales frente a los gravámenes económicos y sociales. La disminución de las emisiones puede requerir una desinversión concreta; una estrategia de circularidad es capaz de producir economías subsiguientes; y una tecnología de vigilancia, aunque eleve los desembolsos preliminares, disminuye mermas al tiempo. El marco renovado habrá de posibilitar la mensura de estos

nexos con métricas económicas y ecológicas conjuntas, en vez de exhibir ambas informaciones aisladamente.

La evaluación integrada debería integrar también sistemas de retorno de información. Al ponerse en práctica una política, sus desvíos tienen que ser medidos y contrastados con los pronósticos originales. De haber disparidades considerables, el esquema conceptual debería posibilitar la dilucidación de los motivos y la modificación de las resoluciones. Esta lógica convierte la evaluación en un proceso continuo de aprendizaje institucional. En términos de gestión, el sistema deja de funcionar como una fotografía periódica del ambiente y se transforma en un mecanismo de seguimiento y adaptación (Dolnicar et al., 2025).

Para la génesis del modelo delineado en esta investigación, el paradigma emergente podría articularse a través de cinco pilares clave: interconexión, fluidez, visión de futuro, multiplicidad de enfoques y circuito de retorno. La interconexión posibilita relacionar las esferas ambiental, financiera, meteorológica, ingenieril y comunitaria; la fluidez propicia la apreciación de sus mutaciones temporales; la visión de futuro faculta la edificación de contextos hipotéticos; la multiplicidad de enfoques esquiva la simplificación de la sustentabilidad a un numeral solitario; y el circuito de retorno posibilita el perfeccionamiento de los dictámenes con base en los desenlaces constatados. Estos atributos conforman los preceptos metodológicos a partir de los cuales podrá ulteriormente erigirse un mecanismo de Diagnóstico Ecológico Colectivo.

La alteración del paradigma, además, demanda modificar la interrogante central de la valoración. En lugar de indagar solo "¿cuál es el impacto ambiental actual?", la disertación debe abrazar cuestiones como "¿qué elementos lo originan?", "¿cómo habrá de evolucionar?", "¿Qué acaecerá con diversas simulaciones?", "¿Qué opciones ofrecen viabilidad económica?" y "¿Qué determinación habilita un avance armónico en el desempeño ecológico y monetario?" La inclusión de estas indagaciones transforma la valoración ambiental en un dispositivo estratégico para la planificación y trasciende su rol como simple recurso de observancia o regulación.

Dentro de este contexto, los indicadores emergen desempeñando un rol cada vez más intrincado: en un principio narran, luego enlazan, subsecuentemente pronostican y, en última instancia, posibilitan guiar determinaciones. Dicha transformación halla

concordancia con la posterior gestación de los índices expuestos en esta obra: el Índice de Circularidad Inteligente (ICI), el Índice de Huella Ambiental Dinámica (IHAD) y el Índice de Inteligencia Ambiental (IIA). La integración de esta comprensión sin precedentes exige, predeciblemente, una estructura doctrinal que se adapte a agrupar información distinta sin perjudicar la unicidad propia de cada esfera. No se trata, en última instancia, de sustituir las mediciones actuales por un solo número, sino de forjar múltiples niveles de datos: mediciones básicas para valorar, factores resumidos en segmentos concretos y una colección integrada para pensar.

La integración de esta comprensión sin precedentes exige, predeciblemente, una estructura doctrinal que se adapte a agrupar información distinta sin perjudicar la unicidad propia de cada esfera. No se trata, en última instancia, de sustituir las mediciones actuales por un solo número, sino de forjar múltiples niveles de datos: mediciones básicas para valorar, factores resumidos en segmentos concretos y una colección integrada para pensar. Dicha perspectiva viabilizará la preservación del detalle informativo y, paralelamente, la obtención de valoraciones abreviadas para contrastar entidades, geografías y situaciones.

Este desarrollo conceptual abre, indudablemente, un panorama para concebir una infraestructura ambiental operativa continua y con notables capacidades de adaptación; recibe información inédita conforme a su disponibilidad. Las bases históricas proveerán referencias; el monitoreo del desempeño se facilitaría con datos de tiempo real; las predicciones serían posibles mediante modelos de IA y estadísticos; y los escenarios propiciarían la exploración de distintas vías de transformación. De esta forma, la evaluación ambiental evolucionará, pasando de un rol meramente descriptivo a uno más orientado a la anticipación y al auxilio en la toma de decisiones.

1.6. Propuesta conceptual: Sistema Ambiental Integrado de Transformación Sostenible

La proposición del Sistema Ambiental Integrado de Transformación Sostenible (SAITS) emana de la apremiante urgencia por transmutar las directrices fundamentales de la Evaluación Ambiental Integrada en un constructo operativo, uno que sea propenso a entretejer una miríada de variables de índole ambiental, económica, climática, tecnológica y social. Se perfila este sistema bajo la óptica de una arquitectura analítica, donde la información heterogénea que emana de múltiples orígenes sufre un proceso de

metamorfosis para devenir en datos significativos; estos datos posibilitarán el diagnóstico de las coyunturas prevalecientes, la dilucidación de nexos causales, la prospectiva de posibles escenarios futuros y, de manera crucial, el soporte para la toma de determinaciones. La meta primordial no reside en anular los mecanismos de gestión ambiental ya establecidos, sino más bien en tejerlos coordinadamente, en el seno de un marco unificado, facilitando así la contemplación del desempeño integral de una entidad, una región geográfica o un entramado productivo.

La lógica subyacente del SAITS se puede articular mediante un procedimiento desglosado en entradas, una transformación subsiguiente, las salidas resultantes y un circuito de retroalimentación. Las entradas engloban los datos económicos, medioambientales, climatológicos, tecnológicos y sociales que se hallan disponibles; por su parte, la transformación incluye los procedimientos estadísticos aplicados, indicadores cualitativos y cuantitativos, los modelos matemáticos desarrollados y las herramientas analíticas empleadas; las salidas manifiestan el desempeño que se observa actualmente o el que se proyecta a futuro; finalmente, la retroalimentación permite refinar o alterar las decisiones adoptadas con base en la información adquirida. Esta disposición intrínseca transmuta la evaluación de un evento o programa en un proceso dinámico e ininterrumpido, en contraste con su constricción a una mera cuantificación que se lleve a cabo previo o posterior a una intervención específica.

Las variables de entrada constituyen la base informativa del sistema. Entre ellas pueden encontrarse el consumo de agua y energía, utilización de materias primas, generación de residuos, emisiones de gases de efecto invernadero, costos de producción, productividad, inversiones ambientales, exposición a riesgos climáticos y utilización de tecnologías digitales. También pueden incorporarse variables sociales como empleo, condiciones de acceso a servicios, participación de actores y capacidad institucional. La selección debe responder a las características del objeto evaluado, ya que una empresa manufacturera requerirá información diferente a la de un municipio o una institución educativa (Romero et al., 2019).

La faceta económica ocupa una ubicación conspicua en el corpus de información entrante, dado que los ajustes ecológicos exigen caudales monetarios y, subsecuentemente, producen repercusiones sobre la eficiencia productiva. Indicadores tales como los egresos energéticos, la canalización de fondos hacia innovaciones sustentables, los gastos

inherentes a la disposición de desechos, el rendimiento del trabajador, la plusvalía generada y la rentabilidad de los desembolsos en materia ecológica posibilitan dilucidar la interconexión entre el rendimiento económico y el rendimiento ecológico. Semejante acervo documental previene que el análisis se circunscriba meramente a dilucidar si una opción es ventajosa desde el punto de vista ecológico, permitiendo en su lugar escudriñar su factibilidad financiera. En el ámbito de las estrategias de gobierno, facilita la comparación de distintas disyuntivas, tomando en cuenta sus erogaciones de ejecución y los réditos potenciales que puedan acarrear.

Las variables ambientales permiten representar las presiones y condiciones del sistema natural. Entre los principales componentes se encuentran las emisiones atmosféricas, calidad del agua, generación de residuos, consumo de recursos naturales, utilización de materiales y alteraciones del suelo o ecosistemas. Esas señales podríamos agruparlas según qué función tienen en el sistema. Unas designan las causas iniciales, otras pintan el panorama que tenemos ahora mismo, y algunas más señalan lo que se ha hecho para calmar los efectos malos. El enfoque de Evaluación Ambiental Integrada que usa el PNUMA utiliza una forma de organizar todo muy particular que conecta los motivos que originan todo, la fuerza que generan, el estado actual de las cosas, los daños que causa, y la manera de arreglarlo.

Los parámetros meteorológicos amplían el escrutinio a las vulnerabilidades que ahora yacen y las futuras que aguardan. Aparte de consignar las liberaciones de CO₂ equiparables, el dispositivo maneja integrar la calidez, los aguaceros, si hay abasto acuoso adecuado, la reiteración de sucesos extremos y cómo el tendido o las faenas productivas están ubicados frente a las contingencias del tiempo. Esa inteligencia facilita discernir entre lo que una entidad vierte al cambio climático y, aparte, qué tan vulnerable resulta ella ante los efectos de dicho cambio. Una empresa, acaso exhiba bajos índices de emisión, pero, de todos modos, podría estar sumamente propensa a diluvios o a periodos sin lluvia; de forma paralela, una operación podría generar volúmenes considerables de emisión y necesitar, al unísono, enfoques tanto de atenuación como de ajustamiento.

La esfera tecnológica permite la integración de datos relativos a la digitalización, la automatización, la conectividad y la potencia computacional. Dispositivos IoT, herramientas de gestión corporativa, entornos virtuales, imágenes espaciales y aparatos sofisticados son capaces de producir datos con una periodicidad netamente más elevada

que los mecanismos convencionales. Tal circunstancia hace factible el escrutinio de transformaciones ambientales al instante y la identificación de desviaciones antes de que desemboquen en inconvenientes de mayor envergadura. No obstante, la arquitectura computacional igualmente ha de documentar las repercusiones inherentes a la infraestructura digital, tales como la demanda energética, la producción de desechos electrónicos y la aplicación de elementos esenciales (Romero et al., 2019).

Una vez recopiladas las entradas, comienza la etapa de transformación de datos en información ambiental integrada. Esta etapa puede incluir depuración de bases de datos, normalización de indicadores, análisis estadístico, construcción de índices, identificación de relaciones causales y generación de escenarios. La normalización es particularmente importante cuando se combinan variables expresadas en unidades diferentes, como toneladas de CO₂, dólares de inversión, kilovatios-hora de energía o toneladas de residuos. Mediante procedimientos adecuados, estas variables pueden convertirse en escalas comparables sin perder la información necesaria para interpretar sus resultados.

La mutación puede involucrar también enfoques econométricos, así como inteligencias artificiales. Es que los modelos econométricos logran investigar vínculos entre factores ambientales y financieros; asimismo, algoritmos de machine learning son capaces de descubrir tendencias y proyectar futuros. Pongamos por caso, un modelo sería apto para calcular la interrelación entre actividad productiva y formación de desechos, a la par que un algoritmo pronosticador podría vislumbrar la cantidad de desechos probables en venideros lapsos. La yuxtaposición de estos dos abordajes posibilita fusionar la potencia descriptiva de la econometría juntamente con la aptitud predictiva del aprendizaje automático.

La cimentación de escenarios es un pilar insustituible en el SAITS. Su habilidad para escenificar múltiples senderos, guiada por decisiones y presiones del exterior, es crucial. Un posible futuro que podríamos perfilar sería la continuidad de lo actual. De modo distinto, uno podrá presentar visiones de la economía circular como norte. O acaso, podríamos labrar un tercer escenario que albergara la transformación digital. Incluso un panorama más exhaustivo abarcaría simultáneamente circularidad, el compromiso climático y la evolución digital. Cormier y Suter destacan que la evaluación predictiva permite comparar las consecuencias de diferentes alternativas de gestión, incluyendo riesgos, beneficios y costos.

Adicionalmente, los escenarios poseen una función económica al posibilitar el análisis de los costos de transición, así como los beneficios proyectados a futuro. La inversión en sensores inteligentes, para poner un ejemplo, puede incrementar los gastos iniciales, pero, consecuentemente, reducir el consumo energético y las mermas de materiales. Paralelamente, una estrategia de reutilización podría solicitar una infraestructura supletoria antes de que los ahorros se muestren. El examen de escenarios da la facultad de cuantificar tales impactos a lo largo del tiempo y establecer las condiciones en las que una decisión parece benéfica. Entonces, la sostenibilidad se incrusta por sí sola en el proceso de evaluar inversiones y no se queda a un lado del análisis económico.

Las salidas del sistema se podrían manifestar por medio de indicadores singulares, baremos de acierto y valores consolidados. Un posible resultado podría ser el decrecimiento porcentual de emisiones, la disminución del uso de agua, la mayor obtención de materiales recuperados o la aminoración de los gastos energéticos. En un peldaño superior, veremos que se agrupan múltiples factores que se usarían, ciñéndose a que su formulación es clara y su basamento metodológico. Esta organización permite mantener datos finos para la evaluación técnica y, a la vez, elaborar informes sumarios para la dirección de compañías u organizaciones.

Según Ávalos y Ávalos (2016), la propuesta se enfoca además en el desarrollo de tableros de mando tanto para el ámbito ambiental como para el económico. Estos artefactos tendrían la facultad de reflejar instantáneamente métricas clave. Se trataría de índices como el uso de energía, las emanaciones contaminantes, la producción de desechos, la carga material, los gastos ecológicos y las amenazas climáticas. Cuando se combinan con sistemas de alerta, permiten identificar desviaciones respecto de los objetivos establecidos. La transformación digital puede desempeñar aquí un papel fundamental al automatizar la recopilación de datos y facilitar su visualización para los responsables de la toma de decisiones.

Una característica fundamental del SAITS es la retroalimentación. Tras poner en práctica una política o inversión ya definida, resulta fundamental comparar los resultados obtenidos con las expectativas originales. Si una iniciativa no alcanza la disminución de emisiones prevista, el sistema debería dilucidar las razones primordiales: contratiempos tecnológicos, cambios en la manufactura, respuestas del comprador final o debilidades en los fundamentos del modelo. El dato recogido servirá para ajustar los pasos a seguir y

perfeccionar los pronósticos. De esta manera, la valoración deja de ser un proceso de línea recta y adquiere una naturaleza flexible.

La retroalimentación es crucial de forma excepcional en escenarios dominados por la incertidumbre y una rápida evolución tecnológica. Las tecnologías pueden ver sus costos reducidos, o bien surgen opciones alternativas, o cambian las tendencias de consumo. Igualmente, las variables climáticas presentadas tienen el potencial de desviar las previsiones originales y alterar el suministro de recursos. Un marco estático corre el riesgo de quedar obsoleto con celeridad, no así un sistema adaptable que es capaz de asimilar información novedosa y reformar sus sugerencias. Por consiguiente, la valoración integrada debiera ser vista como un mecanismo que aprende de las consecuencias y se perfecciona continuamente.

La gobernanza, como elemento crucial, es otra dimensión intrínseca al SAITS. Las fuentes potenciales de datos ambientales, un espectro amplísimo, abarcan corporaciones, administraciones territoriales, entidades de saber, entidades supervisoras, redes de vigilancia y la ciudadanía en general. Garantizar la fiabilidad y la robustez de los hallazgos amerita, inexorablemente, la instauración de directrices para la calidad, el rastreo de origen, la compatibilidad entre sistemas y la protección de los datos. Asimismo, el marco de gobernanza ha de dilucidar con precisión las facultades de acceso a la información, los encargados de la validación de los indicadores y las responsabilidades inherentes a las resoluciones que emanan del sistema. La mera presencia de recursos tecnológicos, divorciada de procesos de gobernanza sólidos y pertinentes, puede desembocar, lamentablemente, en deficiencias significativas de transparencia y credibilidad.

En términos territoriales, el sistema puede aplicarse a diferentes escalas de análisis. A nivel empresarial, usted puede examinar los procesos de producción y las cadenas de suministro; por otra parte, a nivel municipal, su examen podría incluir los residuos, el agua, la energía y la movilidad; de manera territorial, se presenta la aptitud de considerar riesgos climáticos, infraestructura y la actividad económica; por último, a nivel sectorial, el desempeño ecológico de diversas industrias es capaz de ser contrastado. La naturaleza misma de la habilidad de utilizar una estructura colectiva permite establecer comparaciones y señalar discrepancias significativas en las facultades de transición sustentable.

La propuesta articula mediante una estructura cinco componentes funcionales: diagnóstico, medición, predicción, decisión y aprendizaje. El diagnóstico se centra en identificar condiciones y problemas que se presentan ahora; la medición se encarga de cuantificar el desempeño usando indicadores apropiados; la predicción se dedica a estimar trayectorias que son probables; la decisión busca comparar alternativas diversas y establecer prioridades entre intervenciones; y el aprendizaje aprovecha resultados que se obtuvieron para hacer actualizaciones en el sistema. Esta secuencia permite integrar las funciones tradicionales de evaluación ambiental con herramientas modernas de análisis de datos y modelización.

El SAITS, además, podría albergar un dispositivo de priorización de intervenciones. Puesto que no todo problema ambiental posee igual trascendencia ni toda solución demuestra la misma equivalencia costo-beneficio. Por tal motivo, las diversas alternativas podrían ser agrupadas atendiendo a la dimensión del impacto, el gasto para su ejecución, la disminución probable de emisiones, la economía de recursos, la fragilidad climática y la destreza tecnológica. Una entidad, a manera de ilustración, podría percatarse, verbigracia, de que una erogación comparativamente menor destinada a la optimización energética proporciona mayores réditos ecológicos que un dispendio hartó más oneroso en cuanto a una tecnología para el aprovechamiento de residuos. El sistema propiciaría la secuenciación de las intervenciones conforme a parámetros cuantificables.

La estructura propuesta permite además incorporar el concepto de transformación sostenible anticipatoria. Por este método las empresas anticipan retos medioambientales en lugar de abrazarlos, usando datos pasados y actuales para ver eventualidades y ocasiones ventajosas. Un crecimiento constante en la demanda de energía podría impulsar investigación temprana antes de que los costes se disparen alarmantemente; un aumento en la generación de residuos puede impulsar transformaciones en el diseño del producto; y una debilidad climática constantemente elevada podría incitar la asignación de recursos a infraestructuras adaptadas. La prospectiva redefine el enfoque usual de respuesta tardía hacia una gestión preventiva.

La interconexión entre economía circular, ambiente y transformación digital tiene cabida dentro de dicho sistema por medio de módulos distintos. El módulo de economía circular registraría eficiencia en materiales, su reintegración, labores de mantenimiento, obtención, seguibilidad; el módulo ambiental revisaría liberaciones, peligros, adecuación;

y el módulo digital, que sopesaría el aprovechamiento de información, internet de las cosas, inteligencia artificial, automatización, incluiría costos ecológicos. Los resultados de estos módulos podrían posteriormente alimentar un índice integrado. Esta estructura modular permite mantener la especificidad de cada dimensión sin perder la visión sistémica (Ávalos y Ávalos, 2016).

Una ventaja adicional de la arquitectura propuesta consiste en que permite incorporar progresivamente nuevas fuentes de información y tecnologías. El sistema puede comenzar con indicadores tradicionales y posteriormente incorporar sensores, imágenes satelitales, inteligencia artificial, Blockchain u otras herramientas. De esta forma, la sofisticación tecnológica puede adaptarse a las capacidades económicas y técnicas de cada organización. Una pequeña empresa no necesariamente necesita la misma infraestructura digital que un municipio o una gran corporación, pero puede aplicar los mismos principios metodológicos utilizando un conjunto reducido de indicadores.

La arquitectura del SAITS puede expresarse conceptualmente de la siguiente manera:

Datos ambientales + datos económicos + datos climáticos + datos tecnológicos + datos sociales → procesamiento e integración → indicadores e índices → escenarios y predicciones → decisiones → resultados → retroalimentación.

La arquitectura planteada concibe la interconexión del saber, erradicando silos informativos entre departamentos e instituciones. Es factible vincular las métricas de producción con las de consumo energético, estas últimas con las emanaciones contaminantes y, a su vez, correlacionar estas últimas con las metas climáticas trazadas, sin olvidar relacionar los resultados obtenidos con las inversiones requeridas para la optimización del rendimiento.

En el contexto de esta obra, el SAITS constituye la base conceptual sobre la cual pueden desarrollarse posteriormente los diferentes índices y herramientas de evaluación. El Índice de Circularidad Inteligente permitirá representar el grado de aprovechamiento y gestión inteligente de los recursos; el Índice de Huella Ambiental Dinámica permitirá observar la evolución de las presiones ambientales; y el Índice de Inteligencia Ambiental permitirá valorar la capacidad de una organización para utilizar información y tecnología con fines predictivos y ambientales. Estos instrumentos podrán posteriormente integrarse en una metodología más amplia de transición sostenible.



ECONOMÍA CIRCULAR INTELIGENTE: DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS A LA INTELIGENCIA DE LOS RESIDUOS



CAPÍTULO II

ECONOMÍA CIRCULAR INTELIGENTE: DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS A LA INTELIGENCIA DE LOS RECURSOS

2.1. Evolución del paradigma de economía circular

La economía circular representa una mutación paulatina de los lazos que unen crecimiento económico, fabricación, ingesta y empleo de recursos naturales. El progreso de esta paradigmática transformación se fundamenta en las restricciones ambientales y financieras inherentes a un paradigma de constante extracción de materias primas y subsiguientes desechos. Conforme el tiempo avanzó, esta noción transmutó desde tácticas focalizadas en el vertido y la reutilización hasta visiones que aspiran a preservar la utilidad de bienes, sus elementos constitutivos y materias primas. Tal desarrollo engloba progresivamente perspectivas atinentes a la optimización de insumos, la restauración ecológica y la aplicación de saberes tecnológicos digitales.

La economía lineal, que funda su razón de ser en la extracción de recursos primarios, su ulterior metamorfosis, la circulación y el descarte postrero, traza su senda desde este punto de inicio. Tal paradigma facilitó la consolidación de estadios fabriles y un alza exponencial de la productividad; no obstante, su secuela ha sido un apego exacerbado a los menguados bienes del orbe natural. Considerado desde el prisma económico, uno de sus óbices capitales yace en la incompleta imbricación de innúmeros gravámenes medioambientales dentro de las dinámicas mercantiles. Degradación ecosistémica, acopio de desechos, merma de yacimientos y contaminación pueden erigirse en externalidades que repercuten adversamente sobre el conglomerado social, mermando con ello el sustento duradero del auge expansivo (Espinoza, 2023).

El modelo lineal provoca un detrimento económico severo al finalizar el ciclo de vida de las mercancías. Los artículos descartados, al llegar al fin de su itinerario, contienen materias, partes, energía incorporada y saber hacer en su elaboración que definitivamente mantienen utilidad. Sin embargo, al ser señaladas como residuos, estas cualidades pierden su valor significativo y requieren gastos extra para reemplazarlas. Esta situación presiona constantemente la extracción de recursos nuevos y eleva la cantidad de desechos creados.

CAPÍTULO 2. ECONOMÍA CIRCULAR INTELIGENTE: DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS A LA INTELIGENCIA DE LOS RECURSOS

Las barreras propias del esquema lineal motivaron la búsqueda de métodos orientados a reincorporar parte de los materiales ya desechados.

Una primera contestación favoreció la idea de una economía de reciclaje, enfocándose en reaprovechar materiales después de su uso. Reciclar permite volver a meter basura en ciclos productivos, rebajando un poco lo que necesitamos de materias primas nuevas. Asimismo, podría rebajar los desperdicios que van al basurero y fomentar empleos en juntar, separar y transformar. Sin embargo, hay límites claros, pues usualmente interviene cuando el producto ya no sirve para nada. Y claro, al reciclar algo, no se mantiene igual todo su valor monetario, energético o de uso que tenía al principio.

La economía circular presenta una mirada de fondo afín, considerando que se pronostica la reincorporación de materiales de entrada desde el inicio del desarrollo y manufactura. La aspiración principal de este enfoque estriba en alargar la duración activa de los artículos, los recursos y los componentes valiosos dentro del movimiento comercial, protegiendo la cualidad intrínseca de su provecho de cualquier menoscabo. Consecuentemente, tácticas tales como la minimización del uso de provisiones, el reuso, la compostura, la restauración, la recomposición y el reciclaje adquieren preponderancia significativa. La circularidad entonces transforma el paradigma operativo corporativo, dado que el éxito de una entidad ya no se juzga solamente por su volumen productivo, sino que abarca también la cantidad de valía preservada de las provisiones empleadas.

De acuerdo con Espinoza (2023), el diseño de productos adquiere un rol estratégico en esta transición. Resistencia, modularidad, sencillez de reparación y la capacidad de desmontar delimitan los caminos para alargar la vida útil y recuperar componentes. Un artículo pensado para ser arreglado podrá continuar creando valor a través de diferentes etapas de uso; al revés, uno que se piensa para reemplazar pronto eleva la necesidad de materiales nuevos. Vistos desde una perspectiva económica, estos aspectos pueden reducir costos relacionados con recursos esenciales y abrir puertas a sectores de reparación, asistencia, reconstrucción y aprovechamiento. La circularidad así empieza a confluir con el ingenio corporativo y la gestación de nuevos esquemas de negocio.

Una fase avanzada, denominada economía circular regenerativa, abarca un panorama más extenso acerca del vínculo entre la acción económica y los dominios naturales. Disminuir desperdicios y optimizar el aprovechamiento de materiales, si bien mitiga el impacto ecológico, no siempre recompone entidades vivientes ya perjudicadas. La óptica

regenerativa postula que las faenas económicas han de ponderar la aptitud de resiliencia de los sistemas naturales y, si la ocasión lo permite, colaborar en su restablecimiento. Tierra, líquido, variedad biológica y biomasa emergen como capitales inherentes esenciales, cimientos de la producción y el goce económico.

La regeneración altera, además, la comprensión inherente de la sostenibilidad proyectada a largo plazo. Los recursos naturales no solo son simples insumos para la manufactura de bienes, sino que representan además la fuente de servicios ambientales, esenciales para el funcionamiento económico. La escasez de agua, la calidad del suelo, la estabilidad climática y la riqueza biológica son determinantes cruciales para la rentabilidad de varias industrias. Consecuentemente, una economía circular regenerativa aspira a que las corrientes de producción y de consumo armonicen con las aptitudes intrínsecas de los ecosistemas para renovarse. Por lo tanto, la circularidad transiciona de un enfoque principal en la minimización de mermas materiales hacia una visión que integra activamente la salvaguarda y el restablecimiento de los atributos medioambientales que sostienen la actividad económica.

La próxima mutación se asocia a la economía circular inteligente, una fase definida por la conjunción de herramientas digitales en la administración de bienes materiales y capitales. El Internet de las Cosas, la inteligencia artificial, el Big Data, la Blockchain, sensores y esquemas de rastreo posibilitan la recolección de información en distintas fases de la existencia de los elementos. Estos aparatos serían capaces de proveer detalles concernientes a la ubicación, la constitución, el empleo, el estado y el desempeño de productos y sus partes. El acceso a la información simplifica determinaciones tocantes a la conservación, la compostura, la reincorporación, la extracción y el reprocesamiento, acrecentando la aptitud de las entidades para administrar los recursos con mayor eficacia.

La economía circular inteligente también supone un vuelco de una táctica de manejo mayoritariamente reactiva a una más predictiva. La inteligencia artificial, dado su don para analizar información antigua y data actual, facilita prever el surgimiento de residuos, calcular el tiempo de vida de objetos y detectar fallos inminentes antes de que ocurran. El Internet de las Cosas amplía estas aptitudes por medio de sensores incorporados en máquinas, coches y bienes. La combinación de ambas tecnologías permite intervenir antes de que se produzcan pérdidas materiales, lo que puede reducir costos operativos y mejorar simultáneamente el desempeño ambiental (Ochoa et al., 2025).

No obstante, la digitalización de la circularidad también genera nuevos desafíos. Los centros de datos, dispositivos electrónicos, sensores y redes requieren energía, materiales y minerales que poseen impactos ambientales durante sus procesos de extracción, fabricación y disposición. Por consiguiente, la economía circular inteligente no debería asumir que cada tecnología digital genera beneficios ambientales por sí sola. Es imperativo contrastar los insumos de la infraestructura tecnológica con los efectos positivos derivados de la disminución de desechos, la mayor eficiencia material, la recuperación y la prolongación de la durabilidad. La transformación de este esquema supondría entonces transicionar de un modelo basado en la extracción y el descarte a esquemas aptos para preservar, recuperar, regenerar y prever, así como integrar progresivamente los recursos físicos y los datos esenciales para su óptimo manejo.

2.2. Del residuo al activo ambiental

La mutación hacia un modelo de economía circular transforma radicalmente la noción convencional de desecho dentro de la maquinaria económica. Mientras en el esquema lineal, los desechos a menudo se percibían como inservibles, y su manejo implicaba primordialmente un gravamen para corporaciones, unidades familiares y el erario público. No obstante, bajo el prisma circular, un desecho puede retener cualidades físicas, químicas, energéticas o funcionales, viabilizando su reintegración en flujos productivos subsiguientes. Dicha metamorfosis conceptual faculta un abandono de la administración enfocada únicamente en la disposición para abrazar un paradigma sustentado en el rescate y la preservación del mérito económico y ecológico de los bienes.

La revalorización de desechos representa una de las maneras primordiales de transformar elementos ya no útiles en fuentes generadoras de valor. Diversas metodologías, incluyendo la reutilización, el reciclaje, la extracción de partes constituyentes, la modificación intrínseca de la materia o la captación energética, permiten su consecución, variando en función del tipo de residuo. La factibilidad monetaria de estas vías se ve influenciada por elementos cruciales como la cantidad de material disponible, su calidad intrínseca, su composición química, los gastos asociados al traslado, la complejidad técnica demandada y la presencia de demanda para los materiales que se logren reintegrar. Consecuentemente, la valorización debería ser abordada como un proceso financiero, donde las ventajas ecológicas, acopladas a los gastos de su restauración, dictaminan la pertinencia de devolver un recurso al ciclo productivo (Bagum et al., 2024).

La posibilidad de valorizar se enlaza íntimamente con la índole y factura de los desechos. Desechos mezclados o enviciados precisan, de forma probable, pasos suplementarios de criba y cura para su ulterior empleo. Mecanismos de cribado robótico, perceptores y sistemas de entendimiento artificial soslayan tales trabas mediante identificación de géneros más fehaciente. Una destreza más amplia en la clasificación propicia la obtención de materias primas de segunda mano con atributos más uniformes y seguros, amplificando su mercado potencial y menguando la sujeción a materiales no explotados.

Subproductos industriales constituyen otra fuente valiosa en sistemas circulares. Durante una actividad productiva, materiales que no son el producto principal, pero tienen características útiles pueden generarse para otros procesos. En vez de enviarlos a disposición final, las compañías los usan como insumos. Este mecanismo reduce tanto los costos de eliminación como la demanda de nuevas materias primas por adquirir. Identificar estos flujos exige conocer las cantidades generadas, sus características técnicas, su disponibilidad temporal y las actividades productivas capaces de emplearlos.

Esta idea direcciona a la concepción de simbiosis industrial, la cual se define como un vínculo de transacciones donde variadas entidades utilizan de forma colaborativa recursos como materia, combustible, líquido, soportes o remanentes. Las corporaciones interrumpen la disección de sus desechos solo desde un punto de vista interno; principian a mirarlos adentro de una trama productiva extensa. Un residuo generado por una organización puede convertirse en un insumo para otra, reduciendo los costos ambientales y económicos asociados con ambas actividades. La proximidad geográfica, especialmente en parques industriales, puede facilitar estos intercambios al reducir los costos logísticos.

La simbiosis industrial igualmente potencia la eficiencia espacial de los recursos. Empresas conectadas por intercambios de materiales, energía o agua logran reducir mermas y valorizar materiales antes desechados. Dilucidar semejantes perspectivas exige información relativa a los procesos de producción, así como a los flujos entrantes y salientes de cada entidad constitutiva. Las plataformas digitales facilitan esta estructuración por medio de depósitos de información que comunican acerca de la suficiencia de insumos, sus cantidades, localizaciones geográficas y las firmas que podrían hacer uso de ellos en calidad de base productiva.

Los remates de insumos, en su función de plazas, tejen un entramado económico elemental, sustentando la supervivencia misma de la revalorización. En tales mercados circulan insumos recuperados, bienes remanufacturados, partes rescatadas y vírgenes que vuelven a usarse. Su presencia posibilita la transmutación de fuentes que antes tenían un valor económico nulo en objetos negociables. No obstante, para que estas plataformas compitan, resulta crucial asegurar parámetros de calidad, acceso, fiabilidad, seguimiento y costos que faculten a las firmas para confrontar los materiales secundarios con opciones de fuentes nuevas (Bagum et al., 2024).

La competitividad de los materiales secundarios depende también de las condiciones de los mercados de materias primas. Cuando los recursos vírgenes presentan precios reducidos, puede resultar difícil para una materia prima recuperada competir económicamente, especialmente si requiere procesos adicionales de clasificación o tratamiento. Por el contrario, cuando existen aumentos de precios, restricciones de suministro o dificultades logísticas, los materiales secundarios pueden adquirir mayor atractivo. Dicha conexión revela la intrínseca asociación de la economía circular con las fuerzas de la oferta, la demanda, los costos de producción y los peligros de suministro.

Una barrera crucial para el crecimiento de estos mercados surge de la disparidad de la información. Los compradores exigen una comprensión profunda acerca de la composición, origen, calidad y condición de los materiales recuperados, anterior a su incorporación en procesos de manufactura. Esta deficiencia de datos puede intensificar la confusión e incrementar los costos operacionales. Las metodologías de rastreo digital ofrecen paliar este desafío a través de la documentación referente a la génesis, atributos y trayectoria de los materiales. Por ende, la información emerge como un componente que propicia la fe entre partes y optimiza la operatividad de los mercados secundarios.

De acuerdo con De Miguel et al. (2012), el concepto de valor económico oculto de los residuos surge precisamente de reconocer que la ausencia de un mercado inmediato no significa necesariamente ausencia de valor. Un residuo electrónico aloja metales y partes aprovechables. De los escombros de obra, se pueden extraer elementos que se reúsan. Y de los desechos orgánicos surgen productos tipo compost, biogás o abonos. El valor que emana de esto fluctúa según la tecnología, los gastos de rescate y cuánto se busca. La innovación en ciencia y técnica reajusta sin parar hasta dónde llega el potencial económico recuperable.

Conforme a una óptica de gestión corporativa, la metamorfosis de desechos en recursos valiosos tiene la potencialidad de propiciar economías de escala y bifurcar vías de rentabilidad. Una entidad corporativa tiene la facultad de aminorar las erogaciones inherentes a la disposición final, contraer la adquisición de insumos primarios y generar caudal monetario a través de la comercialización de productos derivados. Asimismo, podría forjar nuevas iniciativas concernientes a la reparación, el reacondicionamiento, la remanufactura y la valorización. Por consiguiente, la administración ambiental muta de ser una incumbencia primordialmente ligada a la observancia regulatoria a erigirse en un paradigma de optimización operativa, de vanguardia y de posicionamiento en el mercado.

La digitalización puede fortalecer este proceso mediante la combinación de Internet de las Cosas, inteligencia artificial, Big Data y sistemas de trazabilidad. Los sensores pueden proporcionar información sobre cantidades y características de materiales, mientras que los algoritmos pueden predecir la generación futura de residuos y detectar oportunidades de recuperación. Las plataformas digitales pueden conectar a los generadores con potenciales usuarios de materiales secundarios, reduciendo costos de búsqueda y facilitando intercambios. Así, la transformación del residuo en activo ambiental depende no solamente de procesos físicos de recuperación, sino también de la capacidad de gestionar información sobre los recursos.

La valorización de residuos no solo ayuda a robustecer la resistencia de las cadenas de suministro. Depender puramente de materias primas nuevas puede hacer a las empresas sensibles a los vaivenes de precios, las interrupciones del transporte y las limitaciones de entrega. Incorporar materiales reciclados diversifica las opciones de dónde obtener los insumos y atenúa algo de ese riesgo. Esto es crucial, más aún, para esos materiales de alta importancia o limitados en oferta, cuya presencia podría verse alterada por cuestiones de política global, ecología o finanzas. De esta forma los desechos se transforman en una fuente complementaria de insumos para diversas iniciativas productivas (De Miguel et al., 2012).

No obstante, resulta imperativo reconocer que la valorización de todo tipo de residuo no es universalmente beneficiosa en cualquier contexto. Las metodologías de recuperación, invariablemente, implican la erogación de recursos energéticos, hídricos, logísticos y la instauración de infraestructura, lo cual desemboca en la generación de secuelas ecológicas secundarias. De consiguiente, la determinación pertinente debe abarcar una ponderación

CAPÍTULO 2. ECONOMÍA CIRCULAR INTELIGENTE: DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS A LA INTELIGENCIA DE LOS RECURSOS

exhaustiva del balance ecológico y financiero inherente al ciclo de vida del material. Un proceso de recuperación será favorable cuando los beneficios derivados de evitar extracción de materias primas, reducir residuos y conservar materiales sean superiores a los impactos generados durante su tratamiento. Esta consideración evita interpretar la valorización como un objetivo absoluto y permite seleccionar las alternativas con mayor eficiencia ambiental y económica.

Requiere la transformación del desecho en un valioso activo ambiental, una perspectiva integradora, la cual examine a la vez materiales, tecnología, mercados, información y el territorio en cuestión. Deja de ser el desecho de la culminación del proceso y deviene parte integrante de una corriente posiblemente circular de recursos. Mediante la identificación de subproductos, el fomento de simbiosis industriales, la génesis de mercados secundarios y la implementación de herramientas digitales, se logra la preservación de un porcentaje mayor del valor intrínseco en los materiales. Tal metamorfosis puede colaborar a mitigar la demanda sobre los recursos naturales y simultáneamente propiciar novedosas avenidas de optimización de la eficiencia, reinención y dinamismo económico.

Figura 2.1. Valorización de Residuos y Economía Circular



Elaboración: Autores

2.3. Inteligencia artificial para la circularidad

La inteligencia artificial, en su transformación de la economía circular, posibilita modificar el manejo de los recursos. Mediante el uso de instrumentos sofisticados, permite examinar extensos volúmenes de datos, identificar patrones y anticipar acontecimientos futuros. Mientras que los métodos tradicionales responden después de la aparición de un desecho, una falla o la generación de un residuo, la IA aprende de datos pasados y presentes para predecir dichos acontecimientos. Esta capacidad faculta una transmutación desde una gestión reactiva hacia un modelo proactivo de administración de recursos con perspectiva a largo plazo. Desde una óptica económica, tal metamorfosis podría traducirse en una disminución de los costos operativos, una optimización del empleo de insumos y un aumento en la eficiencia productiva.

Una utilidad primordial yace en la predicción de la generación de desechos. A través de la inteligencia artificial de aprendizaje automático, es factible desentrañar la producción, las ventas, los ciclos estacionales, las conductas de adquisición de los consumidores, la naturaleza de los productos y las dinámicas sectoriales, con el fin de proyectar el volumen de residuos esperado en intervalos temporales predeterminados. Como resultado, es observable una mejora sustancial en la forma en que se estructuran las actividades de recolección, acopio, traslado, clasificación y manejo. De manera similar, prever las cantidades de desechos ayuda a evitar la subutilización de los recursos y la infraestructura, además de reducir los gastos generados por una mala gestión (García et al., 2021).

La previsión, a su vez, otorga la capacidad de identificar las causas ocultas de la producción de desechos en las formas de operar de los ciclos de fabricación. Por medio del escrutinio de datos, los algoritmos son capaces de descubrir nexos entre específicas configuraciones de producción y elevaciones notables en la masa de materiales que son descartados. Una miríada de variables, tales como la cadencia de operación de la maquinaria, la temperatura ambiente, los niveles de presión, la calidad intrínseca de las materias primas o las circunstancias de su resguardo, pueden ser examinadas de forma coordinada. Esta facultad abre la puerta a la intervención directa sobre las raíces del desperdicio previa a su materialización, propiciando una optimización del aprovechamiento de los recursos y una disminución palpable de las mermas financieras. Consecuentemente, la inteligencia artificial asume un rol proactivo, de índole preventiva, inserta en el corazón de la estrategia circular.

Una aplicación adicional reside en la optimización del uso de insumos. Los algoritmos de IA tienen la capacidad de evaluar variadas mezclas de componentes y circunstancias de producción para señalar aquellas que logran los objetivos propuestos empleando menos elementos. Esto halla pertinencia en la concepción de artículos, rutinas industriales, edificación, transporte y demás ámbitos que demandan muchos materiales. La mejora puede originar un beneficio doble: abaratar gastos ligados a las materias primas y mitigar la huella ecológica de su obtención y elaboración. La eficacia en el manejo de materiales se constituye, así como un nexo entre la competitividad empresarial y la sustentabilidad.

El mantenimiento predictivo constituye otra aplicación importante de la IA en sistemas circulares. Los transductores embutidos en unidades mecánicas y aparatos pueden ofrecer datos acerca de vibración, calor, apretón, gasto de energía y rendimiento. Algoritmos concisos consiguen escrutar semejante data para descubrir signos precoces de detrimento y aproximar el azar de un fallo. La injerencia, si se efectuase anticipadamente a una ruina mayor, podría eludir ceses productivos, escarnio de suministros y reemplazos superfluos. Esta capacidad permite administrar los activos productivos de acuerdo con su estado real y no únicamente mediante calendarios de mantenimiento predeterminados.

De acuerdo con García et al. (2021), la vinculación entre el mantenimiento predictivo y la circularidad yace en su capacidad de extender la durabilidad operativa de los activos. Si una máquina entera es descartada por el fallo de una única pieza, se desaprovechan significativamente los materiales y los insumos previamente integrados en la estructura remanente de dicho equipo. Al detectar con antelación el elemento que falla, se posibilita llevar a cabo reparaciones focalizadas o reemplazos segmentados, así extendiendo la operatividad del bien de manera considerable. Este enfoque consecuentemente aminora la presión por adquirir unidades manufactureras de nuevo cuño y, de forma inherente, recorta la generación de desechos vinculados a su relevo. Económicamente hablando, tal proceder también podría resultar en una disminución de los desembolsos de capital iniciales y potenciar la rentabilidad de los capitales vertidos en la edificación productiva.

La inteligencia artificial encuentra aplicación análoga en la predicción de la longevidad de artefactos y sus partes. Basándose en datos referentes a constituyentes, vicisitudes de servicio, legajo de conservación y evolución del artefacto, los algoritmos son capaces de valorar su estado y periodo operativo remanente. Tales datos ofrecen provecho para dilucidar si un artefacto debe persistir en su uso, someterse a reparación, ser modernizado,

resignificado o derivado a la revalorización de insumos. Conseguir una estimación más rigurosa del ciclo de vida funcional previene sustituciones precipitadas o el agotamiento funcional de objetos que ya exhiben un declive sustancial.

Inteligentes sistemas también mejoran la recuperación y clasificación de materiales. Cámaras, sensores y algoritmos de reconocimiento hacen posible identificar diversos tipos de residuos y separar materiales según sus características. La automatización podría aumentar la velocidad y precisión de los procesos de clasificación, particularmente ante grandes volúmenes de residuos o materiales combinados. Una clasificación más eficiente mejora la calidad de las materias primas secundarias obtenidas y puede incrementar su valor comercial. De esta manera, la IA contribuye a conectar la fase de consumo y disposición con nuevos ciclos productivos.

Otra función consiste en facilitar la coordinación entre oferta y demanda de materiales secundarios. Los sistemas inteligentes pueden analizar qué residuos están disponibles, dónde se encuentran, qué cantidades existen y qué empresas podrían utilizarlos. También pueden incorporar información sobre precios, costos logísticos y características técnicas para identificar alternativas económicamente viables. Esto puede favorecer la creación de mercados secundarios y redes de simbiosis industrial, reduciendo los costos de búsqueda y facilitando que un residuo generado por una organización sea utilizado como insumo por otra.

La viabilidad de dichos programas, sin duda, reposa en la calidad y accesibilidad del acervo de información. Los esquemas de inteligencia artificial exigen un volumen de información que sea sustancial, fidedigno y puntualmente actualizado para suposiciones acertadas. Fragmentos de información, fallos en la medición o un compendio sesgado propician inferencias erróneas y desembocan en resoluciones medioambientales o mercantiles inapropiadas. Por esto mismo, la integración de la inteligencia artificial a favor de la circularidad amerita una base informativa robusta, aparatos de supervisión, compatibilidad entre diversos sistemas y protocolos para garantizar la veracidad de la información. La vanguardia tecnológica precisa ser complementada por facultades organizacionales y pericia práctica para interpretar atinadamente sus deducciones (González, 2025).

Simultáneamente, la inteligencia artificial en sí misma produce repercusiones ecológicas que precisan atención. Para entrenar y operar modelos sofisticados, se necesitan servidores, infraestructuras de centros de datos, considerable cantidad de electricidad, complejos sistemas de refrigeración y la tecnología en sí. A esto se suma una demanda cada vez mayor por minerales y partes fundamentales que componen nuestra infraestructura digital, sumada a la posible generación de basura electrónica. Dada esta situación, es imperativo que la integración de IA en la economía circular se analice desde una óptica de ciclo de vida completo. La integración de la inteligencia artificial en la economía circular permite, a largo plazo, desarrollar planes capaces de anticipar posibles escaseces de suministros y orientar la toma de decisiones antes de que ocurran determinados acontecimientos. Mediante plataformas de datos, la predicción de desperdicios, la optimización de materiales, el mantenimiento predictivo, la estimación de vida útil y la recuperación inteligente pueden operar conectadamente. Esta integración, en esencia, metamorfosea la circularidad en un ecosistema intrínsecamente dinámico donde la data faculta el ajuste incesante de las determinaciones tanto productivas como medioambientales. Por consiguiente, la Inteligencia Artificial emerge asumiendo un rol de suma importancia estratégica para potenciar la eficacia en el aprovechamiento de recursos, eso sí, con la condición indispensable de que su adopción sopesa de forma concurrente sus rendimientos pecuniarios y ecológicos.

2.4. Internet de las cosas y trazabilidad de los recursos

El Internet de las Cosas (IoT) se establece como una tecnología crucial que propicia la economía circular. Esta capacidad para vincular objetos físicos, sensores, sistemas de información y plataformas digitales es fundamental. Mediante su implementación, se posibilita la acumulación de datos concernientes al estado, ubicación, operatividad y uso de productos y recursos a través de las distintas fases de su existencia. Tal inteligencia transforma radicalmente la administración de los flujos de materiales en las organizaciones, ya que la toma de decisiones se emancipa de meras aproximaciones y registros espaciados. La existencia de información ininterrumpida propicia un incremento en la eficacia de los recursos y la identificación de vías para la reincorporación, el arreglo y la obtención.

Los sensores ambientales y productivos representan uno de los componentes fundamentales de esta infraestructura. Variables tales como la temperatura, la humedad,

la presión atmosférica, el consumo energético, la calidad del aire, el uso del agua o los parámetros operativos de maquinaria se hallan susceptibles de ser registradas. Durante la ejecución de procesos de índole industrial, la información derivada de estos registros facilita la identificación de cualquier disrupción con respecto a los umbrales proyectados, así como la detección de mermas tanto en materiales como en energía. En lo concerniente al dominio medioambiental, tales mediciones pueden coadyuvar de manera significativa al seguimiento de los estados de los recursos naturales, ofreciendo a su vez datos valiosos para el escrutinio del rendimiento que ostentan ciertas iniciativas económicas.

El valor de los datos surgidos de sensores crece sustancialmente cuando se incorporan a sistemas diseñados para su procesamiento y su correlación con información adicional. Una entidad empresarial tiene la potencia de amalgamar datos relativos a la fabricación, el consumo eléctrico, las labores de mantenimiento, las existencias y la generación de desechos, con el propósito de descubrir patrones inherentes a la eficiencia o al derroche. Dicha fusión propicia la apreciación de los recursos no como entes independientes, sino como componentes de un entramado de movimientos interconectados. El aprovechamiento de información instantánea puede potenciar la habilidad para reaccionar ante irregularidades y menguar pérdidas que hasta ese momento solo se detectaban al concluir una fase productiva.

Asimismo, el IoT propicia la monitorización exhaustiva del trayecto evolutivo de productos y sus partes. Un artículo pertrechado con sensores o vinculado a una representación digital podría transmitir detalles tocantes a su uso, el cuidado que requiere, las intervenciones técnicas y el entorno operativo en el que se desenvuelve. Estos datos permiten conocer con mayor precisión el estado del producto y determinar si todavía puede continuar en funcionamiento. Cuando llega el momento de su recuperación, la información acumulada puede facilitar decisiones relacionadas con reparación, reacondicionamiento, reutilización o reciclaje. De esta manera, el ciclo de vida deja de ser una secuencia poco observable y se convierte en un proceso con mayor disponibilidad de información (Alvear-Puertas et al., 2017).

La identidad digital de los productos funciona como un pilar fundamental para afianzar la trazabilidad. A cada artículo o pieza constitutiva se le vincula un cúmulo de datos detallados acerca de su creador, las materias primas empleadas, el momento de su génesis, sus atributos técnicos, así como las intervenciones o ajustes practicados. Dicha

designación facilita el intercambio comunicacional entre los artífices, los intermediarios comerciales, los usuarios finales, las organizaciones de asistencia y los encargados del manejo de desechos. En configuraciones cíclicas, el acervo de información propicia la distinción entre segmentos para reuso, sustancias aptas para reciclaje y los procedimientos obligatorios para prolongar la utilidad del objeto.

La rastreabilidad adquiere particular relevancia en artefactos complejos, integrando diversos materiales y componentes. Equipos electrónicos, maquinaria de manufactura, automotores, y ciertas construcciones edificantes albergan sustancias que demandan metodologías particulares para su manipulación. Conociendo su estirpe y composición, se abren sendas para operaciones de recuperación optimizadas y seguras. La data digital aminora la perplejidad intrínseca a los materiales subalternos y, a su vez, puede acrecentar su valía dineraria. Así, la trazabilidad facilita que los materiales recuperados se visualicen como activos susceptibles de intercambio comercial.

El empleo de datos en tiempo real facilita una gestión de inventarios y materiales de manera más refinada. Las organizaciones, con esta información, logran una mayor exactitud respecto a los recursos con los que cuentan, su ubicación y las condiciones bajo las cuales se hallan disponibles. Consecuentemente, esto podría disminuir las compras superfluas y, al mismo tiempo, impedir que ciertos materiales se deterioren por inactividad prolongada en almacén. Bajo un prisma circular, la data sobre existencias posibilita la priorización de insumos presentes sobre la subsecuente obtención de nuevos recursos. La digitalización, en este sentido, coadyuva a mitigar mermas y a potenciar el rendimiento del capital material.

Otra aplicación notable se encuentra en el ámbito del mantenimiento inteligente. Sensores diversos registran constantemente la operatividad de una máquina, transmitiendo datos sobre indicios de deterioro. Esta información puede ser diseccionada por algoritmos predictivos, dilucidando el momento idóneo para una intervención. La conjunción de IoT e inteligencia artificial cataliza la mutación de mantenimientos fijos a aquellos que responden al estado intrínseco del activo. Esa interdependencia magnifica la resistencia de los equipos, aminora contingencias inesperadas y esquivo reemplazos innecesarios de componentes.

La rastreabilidad, además, potencia los mercados subsecuentes y la colaboración interempresarial. A fin de que una entidad asimile un recurso reciclado, es menester

certificar su calidad, estofa, proveniencia y accesibilidad. Los portales electrónicos interconectados con esquemas IoT son capaces de refrescar tales datos de forma constante y agilizar la vinculación entre creadores y consumidores. Una empresa podría identificar que determinado material está disponible en otra organización y evaluar su utilización considerando cantidad, distancia, calidad y costo. La tecnología permite así reducir las barreras de información que tradicionalmente dificultan el intercambio de recursos secundarios (Alvear-Puertas et al., 2017).

La integración de Blockchain y otras tecnologías de registro distribuido se presenta como un valioso aditamento a la trazabilidad existente. Estas metodologías aportan maneras sólidas para la anotación de intercambios singulares y el desplazamiento de inventario. Su utilidad cobra vital importancia en entornos intrincados, involucrando varios participantes y siendo indispensable certificar el origen o la ruta de un objeto. A pesar de sus prometedoras ventajas, el rendimiento inherente de estas metodologías se encuentra indisolublemente unido a la veracidad de los detalles registrados y la habilidad de interactuar armónicamente entre sistemas distintos. Importante es recalcar que la simple digitalización de la trazabilidad no erradica de raíz los desafíos inherentes a la gestión de recursos. No obstante, sí tiene el potencial de establecer una base sólida, una infraestructura facilitadora, para potenciar la transparencia y optimizar la coordinación en los procesos de economía circular.

Desde un punto de vista económico, el IoT podrá asistir en la minimización de gastos correlacionados con mermas, conservación, existencias y usufructo de bienes. La data certera propicia el empleo de los bienes en lapsos extendidos y la escasez de intervenciones superfluas. Además, podrá dar origen a servicios innovadores concernientes a la vigilancia, conservación, recuperación y administración de artefactos. No obstante, la instauración de detectores y esquemas electrónicos reclama desembolsos en redes, vínculos, depósito de datos y cautela. Así pues, la conveniencia financiera tendrá que ser apreciada ponderando los desembolsos primarios y los provechos logrados durante el periodo útil del planteamiento.

Según Barrio (2018), el acoplamiento del IoT a la economía circular halla barreras considerables. Estas abarcan interrogantes de privacidad, seguridad digital, interoperabilidad y el manejo pertinente de la información recopilada. Equipos interconectados generan enormes cantidades de información, lo que demanda

almacenamiento seguro, salvaguardia eficaz y un trasvase sujeto a pautas concretas. Incluso, la falta de reglamentos armonizados puede dificultar el entendimiento en el intercambio de datos entre entidades y sistemas distintos. Paralelamente, una infraestructura tecnológica vulnerable podría poner en riesgo la fluidez de los procesos productivos y los objetivos ecológicos. Por lo tanto, la seguibilidad no solo precisa elementos de captura y vínculos comunicacionales. Se requiere también la aportación de esquemas organizacionales y herramientas digitales que confirmen la exactitud de los datos.

La unificación de IoT y trazabilidad posibilita transitar hacia una administración de recursos fundamentada en datos ininterrumpidos, contrastables y situacionales. Los productos pueden ser monitoreados durante su utilización, los materiales pueden ser identificados durante diferentes etapas y los procesos pueden ajustarse según las condiciones observadas. Esta capacidad favorece decisiones relacionadas con reparación, reutilización, recuperación y reciclaje, reduciendo la incertidumbre sobre el estado de los recursos. El valor de la tecnología se encuentra, por tanto, en conectar el flujo físico de materiales con un flujo digital de información.

La implantación de la Internet de las Cosas (IoT) en esquemas circulares se vuelve sumamente importante al asociarse con inteligencia artificial, datos masivos y pasaportes de productos digitales. Los sensores recaban datos; las plataformas facilitan su resguardo y difusión; y los algoritmos resultan ser capaces de escudriñarlos para detectar tendencias y efectuar pronósticos. Concluyentemente, esto deriva en un sistema capaz de supervisar y gerenciar de forma evolutiva los recursos a lo largo de su existencia. Dicha convergencia habilita un incremento en la productividad material y financiera y, al mismo tiempo, sienta los cimientos tecnológicos esenciales para la gestación de paradigmas de circularidad más rastreables, pronosticadores y enfocados en la preservación del valor intrínseco de los recursos.

Figura 2.2. Monitoreo e Inteligencia Digital en la Gestión de Recursos



Elaboración: Autores

2.5. Pasaporte digital ambiental de productos

Un pasaporte digital de productos representa un dispositivo concebido para acopiar y estructurar datos pertinentes concernientes a un producto a lo largo de las distintas fases de su ciclo vital. La relevancia en el ámbito de la economía circular brota de su habilidad para paliar la deficiencia informativa que prevalece en los tratos entre creadores, intermediarios, utilizadores técnicos, reparadores y manejadores de residuos. Mediante una marca digital única, el objeto se relaciona con pormenores sobre sus partes, procedencia, especificaciones de ingeniería, directrices de cuidado y probabilidad de segunda vida. Estos elementos contribuyen a la toma de resoluciones planificadas que impulsan la protección del valor pecuniario y ambiental de los artículos durante periodos prolongados.

La concepción del pasaporte digital brota de la apremiante necesidad de ver el producto en su totalidad, no solo sus partes, sino también su potencial para usos múltiples. Tradicionalmente, en un sistema lineal, cuando un producto cambia de manos al comprador, mucha información crucial se evapora, complicando sobremanera cualquier intento de reparación o reutilización futura. Por consiguiente, el pasaporte digital procura que los datos esenciales permanezcan al alcance de la mano durante toda la existencia del producto. Esto permite que los diferentes actores conozcan las características del producto y puedan tomar decisiones más eficientes respecto a mantenimiento, reutilización, reacondicionamiento, remanufactura o reciclaje (Bernat, 2025).

Uno de los elementos fundamentales corresponde a la información sobre origen y composición. El pasaporte puede registrar datos relacionados con el fabricante, lugar de producción, materiales utilizados, componentes incorporados y características técnicas. El discernimiento de la composición emerge como un factor de particular trascendencia al aproximarse la fase final de la existencia operativa de un artículo, demandando su desmantelamiento o subsecuente tratamiento. La anticipada elucidación de sus componentes constitutivos posibilita una más fluida disociación y el posterior aprovechamiento de sus elementos. Adicionalmente, esto posibilita el conocimiento acerca de la concurrencia de sustancias que hipotéticamente demandarían protocolos de manejo singulares o que ostentan una considerable apreciación dineraria.

El conocimiento detallado de la composición, además, coadyuva a optimizar la administración de recursos materiales de procedencia secundaria. Al poseer datos acerca del origen y las propiedades intrínsecas de los materiales recuperados, las entidades empresariales quedan en una posición ventajosa para sopesar de manera más acertada su potencial aplicabilidad. Dicha capacidad evaluativa mitiga la indeterminación inherente y propicia la consolidación de nichos de mercado alternativos. Así pues, el pasaporte se erige como un catalizador en la vinculación entre el artículo desechado y las futuras fases de manufactura. Con ello, se previene que el material se integre al flujo de desechos carente de especificaciones, permitiendo que retenga una identificación que agilice su reinserción en cadenas de producción renovadas.

Un factor igualmente crucial se relaciona con la huella de carbono vinculada al bien. Dicha información, por ende, hace factible escrutar las emanaciones de gases que intensifican el efecto invernadero. Estas emanaciones se originan a lo largo de segmentos de su existencia, tales como la manufactura, la logística, el uso y la erradicación post-uso, todo lo cual depende del espectro cubierto por la metodología utilizada. La existencia de esta información podría cooperar con organizaciones y compradores en la comparación de opciones. Esto además posibilitaría una evaluación más fundamentada en cuanto al impacto ambiental. De igual manera, puede propiciar la monitorización del comportamiento climático de los bienes y sus respectivas redes de aprovisionamiento.

La incorporación de información climática permite relacionar la economía circular con los objetivos de reducción de emisiones. Un producto reparado o reutilizado puede evitar parte de las emisiones asociadas con la fabricación de un producto nuevo, aunque el

beneficio depende de las características del sistema y de las actividades necesarias para realizar la reparación o recuperación. El pasaporte puede contribuir a documentar estas características y facilitar análisis de ciclo de vida más precisos. De esta manera, la información digital permite vincular decisiones sobre circularidad con indicadores de desempeño climático (Bernat, 2025).

La reparabilidad es una dimensión que además es esencial. El pasaporte puede suministrar datos concernientes a la existencia de repuestos, directrices técnicas, elementos mudables y los estados necesarios para reparar. Este conjunto de datos facilita la labor de técnicos profesionales, atenuando el escollo de los consumidores al tratar de cuidar sus pertenencias. Un incremento en la reparabilidad puede extender la durabilidad y disminuir la urgencia de sustituir artículos enteros. Bajo el enfoque económico, asimismo, podría fomentar los mercadillos de servicios de cuidado y restauración.

La durabilidad representa una dimensión complementaria porque permite evaluar cuánto tiempo puede mantenerse un producto en condiciones adecuadas de funcionamiento. El pasaporte, concebiblemente, engloba detalles referentes a los componentes, especificaciones técnicas, exámenes efectuados, cuidados pertinentes y las circunstancias óptimas para su empleo. Tal información posibilita una apreciación más profunda del desempeño anticipado de lo manufacturado y del diseño de esquemas dirigidos a extender su periodo operativo. La perdurabilidad, innegablemente, se reviste de una relevancia superlativa dado que la ampliación de su existencia útil es capaz de preservar la inversión monetaria subyacente y disminuir la demanda de empleo de nuevos abastos.

Según la perspectiva de Basabe (2026), la posibilidad de reutilizar y reacondicionar artículos podría integrarse dentro del pasaporte. Un artículo que ya no satisfaga las necesidades de su usuario inicial podría retener un valor considerable para ser aprovechado por otro individuo o para un uso distinto. El conocimiento detallado sobre su condición, el historial de su mantenimiento y los componentes accesibles facilitan el discernimiento de estas oportunidades. El reacondicionamiento brinda la capacidad de devolver a la vida aquellos objetos que de otra forma acabarían siendo descartados. Esos mismos objetos pueden ser reintroducidos en el ámbito comercial. Con este proceder, el pasaporte contribuye a que los bienes permanezcan insertos en los flujos económicos por periodos más extendidos.

Asimismo, el potencial de reciclaje se erige como un atributo de significancia considerable, especialmente para aquellos productos que, en última instancia, no son factibles de reutilizar ni reparar. El saber de los materiales que conforman un producto propicio la configuración de procesos de desmantelamiento y separación que resultan ser más efectivos. La información sobre composición puede ayudar a identificar materiales de mayor valor y evitar mezclas que dificulten su recuperación. Esto puede mejorar la calidad de las materias primas secundarias y reducir la cantidad de materiales enviados a disposición final. El pasaporte funciona como una fuente de información para las etapas finales del ciclo de vida.

La utilidad económica del pasaporte depende de su interoperabilidad y actualización. La información eficaz, a fin de cuentas, necesita accesibilidad para la diversidad de actores y sistemas digitales, eludiendo la dependencia estricta de plataformas restrictivas. No solo esto, ciertas informaciones ameritan ser actualizadas ante intervenciones de reparación, modificación, reacondicionamiento o cambio de titularidad del producto. Disponer de información que no esté al día podría disminuir la eficacia del sistema, resultando en determinaciones erróneas. Por tal motivo, la administración del pasaporte digital exige la adopción de estándares técnicos, el establecimiento de mecanismos para su actualización y la clarificación de responsabilidades entre los involucrados en la cadena de valor.

El pasaporte digital asimismo potenciaría la nitidez en los devenires de proveeduría. Los compradores, personas, así como entidades, podrán escudriñar datos relativos a la génesis de insumos, propiedades ecológicas y la índole de manufactura, cuando esos datos se comprueben y estén expuestos. Tal circunstancia posibilitaría selecciones de adquisición dirigidas a bienes de más longevidad, facilidad de arreglo o posibilidad de reintegro. En lo tocante a corporaciones, la franqueza puede transformarse en un rasgo distintivo y un plus competitivo, particularmente en ámbitos donde compradores y normativas exigen más detalles medioambientales.

No obstante, la puesta en marcha del pasaporte requiere hacer frente a desafíos en relación con costos, administración de datos, intimidad y certeza de los pormenores. Las corporaciones han de desviar recursos hacia equipamientos idóneos para allegar, guardar y modificar los datos precisos. Igualmente, tendrán que establecerse protocolos que permitan verificar la veracidad de los detalles ofrecidos. La posesión de datos incompletos o erróneos podría significar un detrimento en el valor del pasaporte, y originar

discrepancias en los detalles. Por consiguiente, la arquitectura digital se beneficiará de la adición de reglamentos, sistemas de contraste y responsabilidades definidas.

El pasaporte digital de viaje tiene la potencia, asimismo, de fungir como catalizador para amalgamar economía circular, mutación tecnológica y huella ecológica. Detallar la conformación, longevidad, factibilidad de arreglo, exhalaciones y propensión al descarte instruye sobre disímiles vertientes de la sostenibilidad del bien. De unirse estos pormenores a Internet de las Cosas, lógica avanzada y mecanismos de seguimiento, se puede perennizar el saber durante la trayectoria vital y concebir pronósticos relativos al cuidado o a la reincorporación. El producto adquiere así una identidad digital que acompaña su trayectoria física y permite conservar información útil para las decisiones económicas y ambientales (Basabe, 2026).

La adopción de pasaportes digitales pareciera allanar el camino para un viraje de una economía de uso y descarte hacia una economía donde el valor de los objetos perdura. Disponiendo de datos pormenores sobre la condición y las propiedades de un artículo, las probabilidades de reparo, segunda vida, puesta a punto, refabricación y reprocesamiento incrementan notablemente. Esto podría decodificar el anhelo de recursos primarios inéditos, además de cultivar nuevas vías de negocio para corporaciones centradas en prestaciones circulares. El pasaporte, entonces, deviene como una red de inteligencia que posibilita el flujo de bienes, ensamblajes y elementos a través de las variadas fases del quehacer económico.

2.6. Índice de Circularidad Inteligente

El Índice de Circularidad Inteligente (ICI) se concibe como un instrumento de diagnóstico para cuantificar en concurrencia cuán ágilmente una entidad, una compañía o una zona aprovecha sus acervos y aplica métodos electrónicos para dirigir sus trayectos materiales. Al contrario de las métricas convencionales de circularidad, que usualmente se enfocan en aspectos tales como reciclaje, reuso o ingesta de materias, este índice engloba también esferas concernientes a la rastreabilidad, la digitalización, la compostura y el rescate. La meta, por tanto, es exhibir la circularidad como un suceso polifacético en el cual coexisten variables ecológicas, digitales y financieras.

La estructura propuesta del ICI puede expresarse mediante la función $ICI = f(\text{Eficiencia de recursos} + \text{Reutilización} + \text{Reparabilidad} + \text{Trazabilidad} + \text{Digitalización} +$

Recuperación). Cada constituyente denota una faceta distinta del rendimiento circular y se mide con parámetros concretos. La interrelación de estas facetas no debe asimilarse a una adición lineal; más bien, las distintas dimensiones podrían exhibir ponderaciones heterogéneas o interactuar de formas complejas. Por ejemplo, una organización podría demostrar una destreza superior en reciclaje, pero una insuficiencia en la rastreabilidad de sus insumos, coartando así su habilidad para optimizar la administración de los activos recuperados (Trollman et al., 2021).

La primera dimensión aborda la eficiencia de recursos, concibiéndose en la procura de dilucidar la magnitud del valor, tanto económico como productivo, derivado de los insumos empleados. Entre los cuantificadores factibles se encuentran la ingesta de materias primas en relación con la producción, la demanda energética por unidad elaborada, la utilización hídrica, la proporción de insumos recuperados y la producción de remanentes. Optimizar estas métricas trasciende hacia un empleo más diestro de las provisiones actuales. Económicamente hablando, la eficiencia material ejerce el potencial de aminorar gastos de manufactura y mitigar la vulnerabilidad corporativa ante fluctuaciones en las tarifas o la provisión de insumos.

La segunda dimensión se refiere a la reutilización; mide la facultad de reintroducir productos, componentes o materiales en renovados ciclos de uso. Posibles indicadores incluyen el porcentaje de productos que son reutilizados, la proporción de componentes que se recuperan, el número de ciclos de uso o el porcentaje de materiales secundarios que se incorporan a la producción. La reutilización posibilita conservar una mayor cuota del valor económico presente en los productos. Adicionalmente, esto podría aminorar la necesidad de materias primas nuevas y achicar los desechos que se producen a lo largo del ciclo de vida.

La reparabilidad se configura como una tercera dimensión clave, ya que posibilita dilucidar la potencialidad de extender la vigencia operacional de los bienes y recursos. Dentro de las métricas factibles, podemos enumerar la existencia de piezas de recambio, el lapso promedio necesario para una compostura, la proporción de partes susceptibles de ser cambiadas, la accesibilidad a documentación técnica y la reiteración de composturas. Un nivel de reparabilidad superior podría mitigar la urgencia de sustituir elementos completos, impulsando así los mercados asociados a la conservación y asistencia especializada. Desde una perspectiva ecológica, alargar la duración de un producto de

manera que posibilite menguar en parte los perjuicios inherentes a la elaboración y el traslado de nuevas mercancías.

La cuarta dimensión engloba la trazabilidad, que significa tener la facultad de averiguar el origen, la posición, los componentes y el recorrido de mercancías y sustancias. Dicha dimensión se podría evaluar a través de métricas tales como el porcentaje de artículos con una identidad electrónica, la fracción de materiales que son rastreables, el acceso a detalles acerca de su contenido y el alcance de los mecanismos de monitoreo. La trazabilidad, en efecto, reduce la duda concerniente a los bienes y simplifica resoluciones atinentes al servicio, la reincorporación, la recuperación y el reciclaje. Subsiguientemente, puede potenciar la claridad en los conductos de abasto y propiciar la operatividad de los mercados accesorios de materiales.

La digitalización señala un ámbito distintivo para el ICI, distanciándolo de métricas económicas circulares convencionales. Dicha evaluación se fundamenta en la incursión de variables tales como la incorporación de sensores IoT, arquitecturas de gestión de datos, aplicaciones de inteligencia artificial, el despliegue de plataformas digitales, mecanismos de automatización y el uso de enfoques analíticos predictivos. La intención subyacente no se limita a cuantificar el acervo tecnológico de una entidad, sino a dilucidar, de forma precisa, la contribución de estas herramientas digitales al fomento de la circularidad. Una empresa con numerosos sistemas digitales no necesariamente presenta un alto desempeño circular si estas tecnologías no generan mejoras verificables en la eficiencia de recursos (Trollman et al., 2021).

La sexta dimensión se relaciona con la recuperación, que examina la habilidad para recuperar materiales, componentes, así como recursos, al concluir las fases de uso. Entre los posibles indicadores, podemos citar la tasa de recuperación de materiales, el porcentaje de desechos valorizados, la cantidad de componentes recuperados y la proporción de materiales dirigidos a procesos de reciclaje o remanufactura. Dicha dimensión facilita la determinación de cuánto del valor material de los productos permanece dentro del sistema económico. A pesar de eso, la recuperación debe ser evaluada tomando en cuenta además la calidad de los materiales obtenidos y los recursos empleados durante el proceso.

Para la elaboración del índice se considera indispensable instituir un método para la estandarización de las variables, pues estas pudieran presentarse en dimensiones dispares. Por ejemplo, la cuota de uso de energía se puede evaluar en kilovatios-hora, a la vez que el porcentaje de reaprovechamiento se cuantifica como tanto por ciento. Una solución posible es la conversión de los indicadores a un rango uniforme, ya sea de 0 a 1 o del 0 al 100. Con referencia a aquellos indicadores en los cuales una magnitud superior implica un rendimiento óptimo, la estandarización debe premiar de forma favorable el incremento; sin embargo, en los casos en que un valor elevado sugiera una mayor tensión ecológica, el espectro debe ser reversado.

Las ponderaciones se consideran otro componente vital del ICI. No todas las dimensiones necesariamente revisten la misma relevancia para una entidad organizativa o área geográfica. Una compañía manufacturera que haga uso intensivo de materiales tal vez dé primacía a la eficiencia y a la recuperación, contrastando con una firma tecnológica que podría priorizar la trazabilidad y la digitalización. Para determinar estas ponderaciones, se pueden emplear diversas metodologías: enfoques estadísticos, la opinión de especialistas, el análisis multicriterio o bien mecanismos de participación ciudadana. La elección de un método particular debe hallar una sólida justificación metodológica que prevenga que el desenlace se vea supeditado de forma exclusiva a juicios subjetivos.

La inteligencia de la gestión de residuos (ICI) puede ser abordada a través de categorizaciones de desempeño innovador. Consideremos, por ejemplo, un modelo escalonado. Iniciaría en un umbral bajo de resultados, con una significativa producción de desechos y una penetración digital limitada, progresando a un estado avanzado. Este estado superior evidenciaría una optimización considerable, la reintegración efectiva de recursos y materiales, la certeza de la rastreabilidad y el uso sagaz de instrumentos digitales. Esta clasificación agiliza la comparación entre empresas, sectores o regiones geográficas y, además, permite señalar las áreas que requieren atención. Adicionalmente, el indicador funge como un instrumento de seguimiento para valorar si las políticas y proyectos implementados están produciendo mejoras progresivamente a lo largo del tiempo.

La aplicabilidad del ICI puede extenderse a diferentes escalas de análisis. En una empresa puede utilizarse para evaluar procesos productivos, cadenas de suministro o líneas específicas de productos. En un municipio es posible examinar facetas atinentes a la

administración de desechos, optimización de recursos, digitalización de prestaciones y revalorización de materiales. En la esfera territorial, puede emplearse para cotejar segmentos económicos o señalar áreas con considerable aptitud para una metamorfosis circular. Tal adaptabilidad posibilita ejecutar ajustes en las variables y cuantificaciones cruciales, conforme a las particularidades del entorno que se pretenda calibrar, sin mermar el andamiaje primario del índice.

De acuerdo con Carpio et al. (2022), la elaboración del ICI igualmente requiere realizar pruebas de resistencia y fiabilidad. Un cambio pequeño en las ponderaciones podría modificar significativamente la clasificación de una organización si el índice no está correctamente diseñado. Por ello, es necesario comprobar cómo responden los resultados ante diferentes escenarios de ponderación y métodos de normalización. La validación puede complementarse mediante análisis estadístico y comparación con indicadores ambientales y económicos existentes. Así pues, es posible dilucidar si el índice refleja con precisión el rendimiento circular o si hay aspectos que precisan modificaciones.

Incorporar, adicionalmente, un componente temporal al índice posibilita calibrar la trayectoria de la circularidad inteligente. Si bien una medición puntual nos informa del estado actual, esta no revela de manera concluyente si una entidad progresa o retrocede. La observación recurrente del ICI facilita examinar el impacto de desembolsos en tecnologías, iniciativas para mermar desechos, mecanismos de arreglo o planteamientos de reutilización. Esta comparación a lo largo del tiempo dota al índice de un carácter de administración, trascendiendo su función meramente diagnóstica.

La función más relevante del ICI es consolidar la circularidad y la metamorfosis digital en un único marco de valoración. La economía circular demanda datos concernientes a materias primas y metodologías operativas, a la par que la digitalización ofrece instrumental para reunir, escudriñar y emplear dichos datos. Integrando estas dos facetas, el indicador permite discernir no solo el volumen de material que se recupera, sino también la aptitud de una entidad para prever mermas, seguir flujos de bienes y explotar información con miras a perfeccionar sus determinaciones. El desenlace se traduce en un examen más comprensivo de la habilidad de un sistema para administrar sus recursos de forma sagaz.

La aplicación ICI finalmente puede servir para orientar decisiones de inversión, planificación ambiental y estrategias empresariales. Una organización podría identificar que posee buenos niveles de reutilización, pero una baja capacidad de trazabilidad, lo que permitiría priorizar inversiones en sistemas digitales. Otra podría presentar elevada digitalización, pero bajos niveles de recuperación, señalando la necesidad de fortalecer la infraestructura física de circularidad. El índice permite así convertir diferentes dimensiones ambientales y tecnológicas en información comparable, facilitando la identificación de prioridades y la formulación de estrategias orientadas hacia una utilización más eficiente, trazable y sostenible de los recursos.

2.7. Economía circular y competitividad empresarial

Una estrategia para la competitividad empresarial podría ser la economía circular, siempre que una gestión de recursos eficaz se incorpore a las estrategias de producción, innovación y mercadeo. La mitigación de desperdicios, la remanufactura de componentes y el alargamiento de la vida útil de productos conllevan optimizaciones de índole económica y productiva. Por ende, la circularidad debería considerarse no únicamente como una norma medioambiental, sino también como un enfoque para transformar la generación, distribución y captura de valor corporativo. Su aplicación habilita la interconexión entre las métricas ecológicas y variables financieras clave como desembolsos, facturación, rentabilidad del capital y utilidades.

Una de las ventajas más palpables radica en la mengua de erogaciones inherentes al uso de insumos. Una organización que minimiza la dotación de materiales de base precisos para la gestación de un componente es capaz de abatir sus gastos variables y realzar la presteza de sus metodologías. La optimización, además, puede extenderse al aprovisionamiento de H₂O, electricidad, combustibles y sustentos colaterales. Cuando tales insumos conllevan una fracción sustancial de los gastos operativos, ínfimas alzas en la presteza son factibles de acarrear consecuentes resonancias económicas. Subsiguientemente, la atenuación del consumo de insumos merma la vulnerabilidad empresarial frente a alzas tarifarias o disrupciones en las redes logísticas.

La circularidad también puede reducir los costos relacionados con la generación y disposición de residuos. El empleo de técnicas de reutilización, reciclaje o restauración puede disminuir la cantidad de materiales enviados a disposición final. Bajo algunas

condiciones, los desechos tienen la posibilidad de convertirse en mercancías, generando mayor provecho para la empresa. Esta metamorfosis altera la interacción común entre la compañía y los residuos, puesto que algo que solía representar un egreso puede transformarse en un elemento económico de valor. El marco operativo circular posibilita, por lo tanto, considerar los residuos bajo la óptica de su utilidad y su potencial para generar valor.

La innovación de productos señala otra vía por la que el modelo circular podría aumentar su fortaleza en el ámbito competitivo. La orientación que busca el desarrollo de componentes de larga duración, susceptibles de reparación, reutilización y reciclaje, propicias mutaciones sustanciales en la materia prima, los subsistemas y las metodologías de producción. Tales alteraciones, conceivably, podrían desembocar en la aparición de productos distintivos, marcando una diferencia clara con aquellas empresas que se aferran a viejas técnicas de manufactura. La innovación ambiental puede convertirse así en un elemento de diferenciación dentro de mercados cada vez más sensibles al desempeño sostenible (Cedeño et al., 2024).

Los principios circulares también promueven el surgimiento de modelos de negocio inéditos. Las entidades, al desviar su enfoque del mero lanzamiento de nuevos productos hacia estrategias de restauración, soporte técnico y remoción de componentes, obtienen diversas ventajas. Estos modelos promueven la consolidación de vínculos más sólidos con los consumidores, así como la generación de ingresos en varios puntos del ciclo de vida de un producto. Asimismo, pueden otorgarles un mayor dominio sobre sus artículos tras la transacción, simplificando su recuperación y su reinserción en nuevos ciclos económicos.

Dentro de estos modelos adquiere especial importancia la servitización, mediante la cual una empresa combina la venta de productos con servicios asociados a su funcionamiento y mantenimiento. El fabricante puede ofrecer mantenimiento preventivo, actualización, reparación o monitoreo durante el período de utilización. Esto altera los alicientes pecuniarios, puesto que una prolongada vida útil de la mercancía podría redundar en provecho tanto para el surtidor como para el consumidor en cuanto la óptica mercantil esté anclada en la efectividad del auxilio. La corporación puede cosechar entradas periódicas y, simultáneamente, salvaguardar una inteligencia ampliada sobre la situación y el desenvolvimiento de los bienes.

Una expresión refinada de la servitización se manifiesta en el paradigma Producto como Servicio, una relación contractual en la cual el utilizador eroga por el aprovechamiento o la capacidad del artefacto, obviando la compra irrestricta de su pertenencia. En este armazón, el productor acomete una obligación prestativa aumentada con respecto a la cosa mueble, observando, incentivado a imaginarla con rasgos de perdurabilidad, inclinación a la compostura y una eficiencia operativa óptima. Si la cosa permaneciere bajo la guarda del proveedor, la recuperación de sus elementos, al finalizar su periodo de utilidad, deviene un proceder más sencillo. Por ende, eso podría ocasionar una disminución en la generación de residuos y abrir la senda a la aplicación de metodologías de conservación, rehabilitación y reconstrucción.

La economía circular provee además beneficios competitivos anclados a la estabilidad del suministro. Compañías que utilizan muchísima materia prima pueden encontrar peligros vinculados a la fluctuación de costos, complicadas logísticas o limitantes en el acceso. Integrar materiales reciclados y esquemas de reutilización habilita la expansión de orígenes de materiales y disminuye un poco la dependencia de materia prima virgen. Esta táctica podrá ser de suma importancia en industrias que emplean minerales cruciales o elementos cuya provisión se concentra en pocas ubicaciones. Por lo tanto, la circularidad se transformará en un mecanismo eficaz para el manejo de riesgos corporativos (Cedeño et al., 2024).

La transformación digital amplía estas posibilidades al permitir monitorear productos y recursos durante su ciclo de vida. Sensores IoT, análisis de datos e inteligencia artificial pueden utilizarse para conocer el estado de los activos, anticipar fallas, optimizar el consumo de materiales y determinar cuándo un producto puede ser reparado o recuperado. Estas tecnologías reducen la incertidumbre asociada con los modelos circulares y permiten tomar decisiones basadas en información. La combinación entre digitalización y circularidad puede generar nuevas oportunidades de eficiencia que difícilmente serían alcanzables mediante sistemas de gestión exclusivamente tradicionales.

La competitividad también puede robustecerse a través de un perfeccionamiento en la administración de la cadena de suministro. Dicho intercambio de información fluida entre proveedores, fabricantes, distribuidores y especialistas en materiales autoriza la detección de tales oportunidades de reutilización y rescate que trascienden las propias fronteras de una entidad singular. Una compañía puede, a modo de ejemplo, conseguir la recuperación

de aquellos componentes derivados de sus productos ya empleados y su posterior reintroducción en innovadores procesos de fabricación. La armonización de esfuerzos entre los distintos intervinientes faculta el aprovechamiento de economías de escala y, a la par, el desarrollo de efectivos mecanismos de logística inversa. Así, es factible que la circularidad se expanda, migrando de ser una mera táctica interna a configurarse como una estrategia integral para la totalidad de la cadena de valor.

Otro factor relevante corresponde al acceso a nuevos mercados y oportunidades de diferenciación. Las entidades que integran preceptos de circularidad logran sortear disposiciones ecológicas, demandas de compradores de gran envergadura, además de mutaciones en las inclinaciones de los consumidores. Posicionarse es facilitado mediante la claridad en cuanto a componentes, factibilidad de reparación, longevidad y la marca ecológica dejada. De igual forma, colectivos que exhiben adelantos contrastables en optimización de insumos ven robustecida su imagen y cimentan vínculos de negocios con clientela que otorga primacía a factores ambientales. La pugna se enlaza consecuentemente con la habilidad para prever transformaciones en el panorama comercial (Bocken et al., 2016).

No obstante, la metamorfosis hacia esquemas circulares demandará capital inicial y competencias organizativas. La modificación de flujos de manufactura, la compra de herramientas, la gestación de plataformas de seguimiento y el establecimiento de cadenas de recolección podrán ocasionar desembolsos previos a la materialización de las ganancias. Las entidades corporativas deberán examinar estas iniciativas a través de valoraciones de capital que contemplen economías de materiales, flujos de ingresos proyectados, aminoración de exposiciones y ventajas ecológicas. La viabilidad económica de un planteamiento circular estará sujeta a los atributos del ramo, el volumen de operaciones, las herramientas factibles y el contexto mercantil.

La economía circular, un paradigma que forja un sendero hacia la competitividad sostenible, se cimienta en una visión optimista de la eficiencia e inyecta ímpetu a la innovación. Empresas, al custodiar con esmero el valor intrínseco de sus activos, consiguen mermar el desecho, diseñar artilugios de vida prolongada y aplicar esquemas sofisticados para la mejora de la gestión de sus posesiones, repercutiendo a la vez positivamente en sus ganancias y en su impacto ambiental. El acicate competitivo no emana exclusivamente de una producción con costos inferiores, sino igualmente de una

CAPÍTULO 2. ECONOMÍA CIRCULAR INTELIGENTE: DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS A LA INTELIGENCIA DE LOS RECURSOS

utilización superior de los insumos, la disminución intrínseca de los riesgos y el diseño de esquemas comerciales con potencial para la generación de valor extendido a través del tiempo. Cuando se acoplan de forma sinérgica la circularidad, la digitalización y la vanguardia innovadora, se promueve el desarrollo de configuraciones corporativas que minimizan su dependencia intrínseca del consumo incesante de recursos vírgenes y exhiben una resiliente adaptabilidad ante las evoluciones económicas y ambientales.



EDITORIAL ANDES COGNITIO

CAPÍTULO III

CAMBIO CLIMÁTICO Y HUELLA AMBIENTAL DINÁMICA: MEDIR EL IMPACTO MÁS ALLÁ DEL CARBONO



CAPÍTULO III

CAMBIO CLIMÁTICO Y HUELLA AMBIENTAL DINÁMICA: MEDIR EL IMPACTO MÁS ALLÁ DEL CARBONO

3.1. Cambio climático como variable económica y ambiental

La alteración climática se presenta al mismo tiempo como un evento ecológico y un factor con repercusiones directas en el operar de las finanzas. Los ajustes en la temperatura, la lluvia, el abasto de agua y la frecuencia de sucesos extremos inciden en la producción, la infraestructura, el trabajo, el gasto y la inversión. Si vemos esto desde el prisma económico, estas repercusiones tienen la capacidad de modificar la eficacia de varios ramos y cambiar los gastos de las iniciativas empresariales y estatales. Debido a esto, la alteración climática debe ser estudiada no solo como un dilema ecológico, sino como un elemento que determina las determinaciones financieras, tanto ahora como más adelante.

De acuerdo con (Cueva, 2014), las externalidades ambientales, una de las ideas medulares para discernir esta interconexión, presentan particular interés. Una externalidad, en su esencia más pura, se manifiesta cuando una transacción económica deja su huella en individuos ajenos a ella, y estos efectos no se ven plenamente reflejados en el precio del mercado. Esencialmente, una externalidad surge si un evento económico tiene un efecto en personas no involucradas directamente y esas consecuencias no son del todo capturadas en el precio del mercado. Básicamente, la externalidad emerge al darse un acto económico que incide en partes externas, pero sin que tales secuelas sean integradas completamente en la valoración del mercado. Tales costos se transfieren, de forma incompleta, a otros participantes en la economía, a las venideras camadas e incluso a la propia naturaleza. Dichas externalidades apuntalan una deficiencia del mercado, permitiendo así la actuación por medio de directrices ambientales y dispositivos financieros.

Las externalidades climáticas exhiben una complejidad intrínseca, manifestándose en dimensiones temporales y espaciales acentuadas. Las emisiones generadas en el presente, por ende, pueden acarrear consecuencias duraderas, extendiéndose a lo largo de décadas e impactando territorios diversos de su punto de origen. En consecuencia, un desafío considerable se manifiesta para los mecanismos de mercado ordinarios al querer

incorporar verazmente el coste completo de tales emisiones. Este desacuerdo en la valorización, por su parte, es capaz de impulsar grados de producción y de consumo que sobrepasen lo que es factiblemente soportable socialmente. La política climática, por naturaleza misma, se configura con el objetivo de aplacar tal desfase, introduciendo instrumentos como gravámenes sobre el carbono, planes de intercambio de emisiones, reglamentos ambientales y alicientes para promover tecnologías de baja emisión.

El peligro climático, otra faceta esencial en la intrincada conexión clima-economía, se concibe como la probabilidad inherente de que ciertos eventos meteorológicos impacten negativamente en la salud humana, el patrimonio, los entornos naturales y las esferas productivas. La magnitud de este peligro se ve intrínsecamente ligada a la confluencia de las amenazas climáticas en sí mismas, la exposición de los elementos en riesgo y la susceptibilidad intrínseca del sistema. De esta manera, un mismo peligro climático puede desencadenar desenlaces dispares en función de su localización geográfica, la solidez de la infraestructura existente, el temple de la gobernanza institucional y la abundancia de recursos al alcance. Por lo tanto, la metódica cuantificación del peligro climático precisa un análisis integral, contemplando tanto las particularidades físicas inherentes al fenómeno meteorológico como las circunstancias socioeconómicas que configuran el sistema bajo estudio.

Los peligros del clima se categorizan en peligros físicos y peligros de transición. Los peligros físicos conciernen a sucesos tales como anegamientos, sequedades, calor extremo, fuegos, vendavales y evoluciones lentas de las temperaturas. Dichas eventualidades son capaces de devastar edificaciones, trabar redes de abastecimiento, mermar cosechas y elevar gastos. Los peligros de transición, no obstante, emanan de las transformaciones económicas, técnicas, normativas y sociales vinculadas al movimiento de bajar la contaminación. Una corporación que genera mucha huella de carbono podría sufrir mermas en su pujanza, cargos normativos superiores o menoscabo de su patrimonio conforme las economías se mueven hacia métodos menos nocivos.

Las repercusiones financieras del calentamiento global se presentan a través de variados medios. El deterioro de estructuras puede precisar desembolsos cuantiosos para reparaciones y conservación, y paralelamente, los sucesos severos son capaces de obstaculizar operaciones productivas y redes de suministro. En esferas de agricultura, las fluctuaciones térmicas y de lluvia tienen el potencial de mermar cosechas y alterar los

desembolsos de fabricación. Igualmente, podrían elevarse los desembolsos inherentes a sanidad, aseguranzas, readaptación y resguardo de bienes. Estas consecuencias tienden a agravarse e incidir en indicadores de corte macroeconómico, tales como expansión económica, asignación de capital, rendimiento y solvencia tributaria (Cueva, 2014).

El nexo entre la variabilidad climática y la generación de bienes adquiere una importancia mayúscula, ya que los desafíos ambientales poseen la facultad de debilitar tanto el volumen como la eficiencia de los elementos de producción. Temperaturas fuera de lo común, al impactar negativamente la capacidad de trabajo, intensifican los riesgos para la salud y, subsecuentemente, agotan el rendimiento de los trabajadores. Dentro de sectores íntimamente ligados a las circunstancias naturales, como podrían ser la agroindustria, la acuicultura o los servicios turísticos, las fluctuaciones ambientales ejercen una influencia notable en la potencia productiva. Adicionalmente, las desorganizaciones derivadas de fenómenos climáticos extremos se traducen en una merma de las horas laboradas y un aumento de los desembolsos de reemplazo y preservación de los activos físicos.

La alteración climática asimismo impacta la productividad del capital. Es decir, las infraestructuras como instalaciones industriales, vías de comunicación, redes eléctricas, residencias y otras obras pueden experimentar percances físicos o un declive en su rendimiento funcional debido a particulares circunstancias atmosféricas. La infraestructura planificada para patrones climáticos pasados podría no ser adecuada ante escenarios prospectivos. Esto consecuentemente exige una elevación en las asignaciones de recursos destinados a la adaptación, el sostenimiento y la modernización tecnológica. En la esfera económica, una proporción cada vez mayor de la inversión podría ser reorientada hacia el resguardo de la capacidad productiva ante contingencias que previamente presentaban una probabilidad menor de manifestarse.

Según Kumar y colaboradores (2025), la faceta económica del cambio climático además se vincula con la distribución de las inversiones. Los actores económicos habrán de integrar paulatinamente datos climáticos al valorar proyectos, bienes y tecnologías. Una inversión que sea lucrativa bajo el clima presente podría mostrar una ganancia distinta al contemplar peligros físicos venideros o alteraciones normativas. La valoración monetaria convencional requiere adicionarse con estudios de contextos climáticos para cuantificar potenciales mutaciones en desembolsos, ganancias y valor patrimonial. Esta integración

permite reducir la probabilidad de realizar inversiones que posteriormente pierdan valor debido a la transición climática.

Desde la óptica empresarial, el riesgo climático se proyecta como un desafío dual: amenazante para unos, pero un poderoso motor de innovación y reconfiguración tecnológica para otros. Las corporaciones que enfrentan presiones crecientes por los costos energéticos, la insuficiencia de recursos esenciales o el endurecimiento de las normativas ecológicas tienen la oportunidad de forjar procesos productivos intrínsecamente más eficaces y tecnologías que minimizan drásticamente su huella de carbono. La asignación de capital hacia la energía eólica y solar, la optimización del consumo energético, la adopción de ciclos de vida de materiales circulares y la implementación de sistemas de vigilancia y control pueden, de hecho, mermar ciertos riesgos inherentes al clima y, a la vez, catalizar distinciones ventajosas en el terreno competitivo. De esta manera, la adecuación a los cambios climáticos y los esfuerzos por atenuar su impacto trascienden su carácter de meras erogaciones ecológicas, emergiendo como pilares fundamentales de un diseño estratégico empresarial proyectado hacia la sostenibilidad y prevalencia en los mercados del mañana.

Las naciones afrontan, igualmente, repercusiones fiscales brotadas de la alteración climática. Eventos catastróficos pueden amplificar el desembolso estatal dirigido a reparaciones, infraestructuras, auxilio social y socorro inmediato, en tanto que una merma en la esfera productiva podría decrecer ciertos gravámenes. Si estas contingencias se reiteran más veces, su capacidad de limitar los caudales para inversión estatal y progreso se vuelve probable. Por consiguiente, la ordenación presupuestaria debe integrar, sin duda, estrategias preventivas y de adecuación con el objeto de mitigar erogaciones subsecuentes. La estrategia climática, por lo tanto, reviste un aspecto de manejo financiero y solidez mercantil (Kumar et al., 2025).

La mudanza hacia una economía con bajas emisiones, innegablemente, produce aparejada la ocasión de riesgos y también, paralelamente, de beneficios económicos. Algunas empresas podrán notar elevaciones de costos, ya sea por normativa, por tasas medioambientales o por la sustitución tecnológica inevitable, mientras otros segmentos del mercado van a poder crecer aprovechando inversiones completamente nuevas. Las fuentes energéticas renovables, aquellas tecnologías que buscan la eficiencia, la movilidad que cuida el ambiente, los servicios que se dedican a protegerlo y las

innovaciones digitales se perfilarán como cada vez más cruciales. Esta metamorfosis ineludiblemente alterará la configuración de cómo producimos y, por ende, puede desembocar en la reubicación de los capitales y de la mano de obra disponible. Por esta razón, una evaluación económica juiciosa sobre la variación climática, a todas luces, requiere tener en cuenta no solo las desventajas potenciales, sino también las ventajosas posibilidades que emanan de la propia mutación de los modelos productivos.

Integrar la mutación climática como indicador económico significa admitir, al fin, que las resoluciones tomadas hoy día forjan, en parte, los peligros y chances que nos deparará el mañana. Los entes corporativos, las administraciones públicas y las unidades domésticas deberían sopesar no solo los gastos perentorios de sus determinaciones, sino, de igual forma, sus repercusiones sobre el grado de exposición, la fragilidad intrínseca, la eficiencia productiva y la aptitud para acomodarse a las nuevas circunstancias. Una prospección monetaria puede abarcar contextos climáticos variables, riesgos inherentes a la física de la atmósfera, peligros derivados de la transición energética y las cargas ecológicas subsiguientes con el objetivo de optimizar la eficacia de las resoluciones tomadas. Consecuentemente, la problemática del cambio climático deja de ser un factor extrínseco al estudio económico para erigirse en un pilar fundamental dentro de la proyección productiva, de la tesorería y de la salvaguarda del medio ambiente.

3.2. De la huella de carbono a la huella ambiental integrada

La estimación de la presión ambiental intrínseca a las actividades económicas recurre de forma prototípica a la huella de carbono, erigiéndola como uno de sus medidores preponderantes. Dicho índice concierne a la cuantificación de los gases de efecto invernadero liberados a la atmósfera por una actividad particular, un bien, una entidad corporativa o un régimen de consumo, usualmente parametrizado en toneladas de dióxido de carbono en su equivalente. Su trascendencia emana de la necesidad imperiosa de elucidar la génesis de dichos efluvios, perfilando por ende estrategias para su aminoración. Con todo, circunscribir la evaluación ecológica únicamente a las emisiones podría soslayar otras manifestaciones críticas de la presión sobre los sistemas ecológicos y la riqueza natural.

La huella de carbono ofrece un instrumento adecuado para dilucidar el rol de los procesos económicos en la alteración climática, pero esta métrica omite la totalidad de sus secuelas ambientales. Una actividad puede tener pocas emisiones de gases de efecto invernadero y a la vez consumir mucha agua, materiales o espacio. Por esto, la evaluación ambiental necesita expandir el estudio a otros aspectos que muestren las tensiones producidas durante los procesos de producción y consumo. El IPCC advierte que es imprescindible considerar transformaciones en los ámbitos energético, industrial, urbano, agrícola y de consumo al evaluar las reducciones de emisiones (Li et al., 2021).

La huella hídrica facilita incluir en el análisis el agua utilizada y alterada, tanto directa como indirectamente, para la creación de bienes y servicios. Su importancia económica aumenta en contextos caracterizados por escasez hídrica, competencia entre usuarios y variabilidad climática. Una empresa puede reducir sus emisiones de carbono mediante determinada tecnología y, al mismo tiempo, aumentar su demanda de agua, generando una posible transferencia de presión ambiental de una dimensión hacia otra. Por ello, el consumo hídrico debe analizarse conjuntamente con las demás huellas para evitar evaluaciones parciales del desempeño ambiental.

La huella material integra los recursos naturales que se requieren para apoyar tanto las actividades productivas como las tendencias de consumo vigentes. Ella comprende elementos como la biomasa, los combustibles de origen fósil, los minerales con propiedades metálicas y aquellos sin ellas, todos ellos utilizados en el transcurso de las diferentes cadenas de suministro. El cuantificar esta huella propicia una apreciación de las repercusiones que no siempre se manifiestan en los indicadores de emisiones estándar y, en particular, se centra en las concernientes a la extracción, el refinamiento y la movilización de las materias primas. De hecho, UNEP se apoya en tales indicadores de huella material con el propósito de asignar la extracción de materiales a nivel planetario a la demanda definitiva de las naciones.

La huella energética representa otra dimensión necesaria para comprender la presión ambiental de las actividades económicas. La medición de la energía va más allá de solo registrar el consumo inmediato de una entidad o región, y hace factible evaluar la energía primaria necesaria para cumplir con una necesidad específica. Tal perspectiva es fundamental, dado que el gasto energético se vincula intrínsecamente con las emisiones, las infraestructuras necesarias y el aprovechamiento de los recursos disponibles. De

hecho, una disminución en la demanda energética promete ventajas económicas, puesto que disminuye los costos de operación. No obstante, las repercusiones ecológicas de esta reducción están fuertemente condicionadas por la fuente energética de procedencia.

La huella ecológica extiende su escrutinio abarcando la inherente facultad de los sistemas vivientes de suministrar materias primas y de metabolizar ciertas repercusiones emanadas de quehaceres humanos. Su óptica posibilita anudar esquemas de ingesta con el aprovechamiento de extensiones geográficas fértiles para la vida. Si bien no suplanta a métricas precisas tipo carbono, acuíferas o elementos tangibles, ofrece un punto de vista consolidado concerniente a la exigencia infligida sobre la aptitud recuperatoria de los ambientes naturales. La literatura sobre indicadores de huella reconoce precisamente que diferentes instrumentos pueden analizar distintas dimensiones de la presión humana sobre el planeta (Li et al., 2021).

La inclusión de la huella digital obedece a la metamorfosis de las conformaciones productivas y sociales ligada a la digitalización. Los avances tecnológicos digitales exigen aparatos, infraestructuras de red, centros de procesamiento, energía eléctrica y elementos primordiales; de este modo, sus ventajas económicas podrían ir de la mano con repercusiones ecológicas. Una plataforma digital quizá disminuya traslados o eleve la eficacia de una acción, mas al mismo tiempo requiere una urdimbre tecnológica cuya génesis y operación producen efectos. Por lo tanto, la valoración precisa debe incluir las consecuencias beneficiosas que emanan de la digitalización a la par que los sustratos indispensables para su preservación.

Desde una perspectiva de ciclo de vida, las diferentes huellas no deben analizarse únicamente en el lugar donde se produce el bien o servicio. Una faceta sustancial de las externalidades recae en las fases previas del circuito de aprovisionamiento: extracción de insumos crudos, producción de energía, manufactura de partes o movilización global. Tal discernimiento implica que una corporación podría exhibir índices ecológicos ventajosos en sus unidades operativas, no obstante, perpetuar una tensión significativa mediante su red de proveeduría. La evaluación de huellas posibilita la integración de estas afecciones colaterales, perfilando más cabalmente el alcance medioambiental vinculado a la solicitud económica.

La demanda de amalgamar diversas métricas deviene de que ningún indicador aislado consigue capturar íntegramente el efecto ecológico. El concepto de "familia de huellas"

propone precisamente emplear métricas adicionales con el fin de escrutar las presiones antropogénicas bajo miradas dispares. El carbono, el agua, los insumos materiales, la energía y la superficie territorial configuran facetas interrelacionadas; sin embargo, no son fungibles. Una disminución en un ámbito específico podría desencadenar repercusiones benéficas, adversas o indiferentes sobre los otros; consecuentemente, la valoración requerirá discernir potenciales armonizaciones y discrepancias entre las metas medioambientales.

De acuerdo con Reyna et al. (2025), la integración de huellas también posee una dimensión económica porque permite relacionar el desempeño ambiental con eficiencia productiva, costos y competitividad. Una empresa que reduce simultáneamente su consumo de materiales, energía y agua puede disminuir costos operativos y mejorar su productividad de recursos. Sin embargo, determinadas inversiones ambientales pueden generar costos iniciales elevados y beneficios distribuidos durante varios años. La evaluación integral ofrece la capacidad de cotejar tales resoluciones al ponderar no nada más las emisiones que se dejan de generar sino igualmente el aprovechamiento de insumos, la atenuación de contingencias y las ventajas financieras que podrían presentarse.

Desde un punto de vista metodológico, un rastro ecológico integral es susceptible de elaborarse incorporando variados parámetros que antes fueron normalizados. Cada esfera de influencia se puede manifestar en una magnitud análoga y acto seguido fusionarse por medio de coeficientes fijados con base en metas ecológicas, particularidades gremiales o directrices científicas. La metodología puede incorporar indicadores de carbono, agua, materiales, energía, territorio y digitalización. UNEP, por ejemplo, desarrolla sistemas de medición que integran diferentes dimensiones de huella y utilizan información económica y ambiental para analizar la presión asociada con la demanda final.

La integración también permite incorporar la dimensión temporal. Las huellas ambientales no permanecen necesariamente constantes, ya que pueden modificarse por cambios tecnológicos, crecimiento económico, transformaciones en los patrones de consumo o políticas públicas. Una reducción de la huella de carbono durante un período determinado puede coincidir con un aumento de la huella material derivado de una expansión de la producción. El seguimiento conjunto de los indicadores permite

identificar estas tendencias y determinar si una economía está reduciendo realmente su presión ambiental o simplemente desplazándola entre diferentes categorías.

La interconexión analítica se revela como esencial para los procesos de metamorfosis energética y tecnológica. Las tecnologías con reducida huella de carbono son capaces de mermar de modo apreciable las emanaciones directas; no obstante, su creación e implantación precisan de insumos materiales, bases infraestructurales y suministros energéticos. El IPCC enfatiza que las sendas de paliación demandan mutaciones radicales dentro de los esquemas energéticos y fabriles, sumadas a alteraciones en las apetencias del consumo, la eficacia operativa y el impulso innovador tecnológico. En consecuencia, un análisis riguroso de la dimensión ecológica resultará imprescindible al abordar las implicaciones inherentes a la implementación y expansión de las innovaciones tecnológicas, de igual modo que sus contribuciones benéficas para el entorno.

Dicho rastro ecológico consolidado tiene potencial de aplicación sobre artículos, colectivos empresariales, ramificaciones económicas, urbes y vastas regiones geográficas. Para una corporación, su adopción posibilitaría discernir qué insumos desencadenan una mayor demanda y en qué áreas brotan vetas de mejora en la optimización. En una ciudad podría relacionar consumo energético, agua, materiales, emisiones y utilización del territorio con las actividades económicas y patrones de consumo de la población. A nivel nacional, los indicadores pueden contribuir a analizar la presión ambiental asociada con la demanda interna y las cadenas internacionales de suministro. Esta flexibilidad permite utilizar el enfoque como instrumento de diagnóstico para diferentes escalas de decisión (Reyna et al., 2025).

Transitar de la huella de carbono a una huella ambiental holística implica, consecuentemente, una redefinición conceptual del análisis del impacto ecológico de las empresas. Dicho esto, no se pretende reemplazar la métrica del carbono, sino más bien integrarla en un marco evaluativo extensivo capaz de visibilizar las diversas cargas sobre el patrimonio natural y las biosferas. La amalgama de datos relativos a emisiones, demanda hídrica, insumos materiales, consumo energético, uso del suelo y huella digital posibilita la conformación de una imagen más nítida de la interacción entre la esfera productiva y el medio, así promoviendo estrategias conjuntas para la atenuación climática, la optimización de recursos y la perdurabilidad.

Figura 3.1. Componentes e Indicadores Principales de la Huella Ambiental



Elaboración: Autores

3.3. La huella ambiental de la transformación digital

La metamorfosis digital ha propiciado avances notables en eficiencia, interlocución, administración corporativa y provisión de asistencia; empero, también entraña una utilización incrementada de elementos naturales. La proliferación de avanzadas soluciones, tales como la inteligencia artificial, las plataformas de cómputo en la nube, los artefactos interconectados y las infraestructuras de red digitales, demanda estructuras tangibles, energía eléctrica, metales preciosos y diversas materias primas. Consecuentemente, la digitalización no se presume de forma intrínseca como un plan ecológicamente viable. Su repercusión requiere ser sopesada, contemplando tanto las ventajas ecológicas que es capaz de originar como los elementos consumidos a lo largo de todo su trayecto vital.

Los centros de datos son algo principal en la economía digital, físicamente. Estas locaciones juntan servidores y maneras de guardar datos, y necesitan electricidad para manejar y guardar mucha información. Además del uso de energía de las máquinas mismas, los sistemas de enfriamiento se usan para mantener funcionando el equipo bien. El aumento de servicios digitales, la nube y la IA está aumentando la necesidad de esta construcción. Por lo tanto, la forma en que los centros de datos tratan al medio ambiente es según su uso de energía, dónde la consiguen, si usan agua y cómo tratan lo viejo.

La proliferación de la inteligencia artificial ejerce frescas tensiones ecológicas por cuenta de las demandas de cómputo vinculadas al adiestramiento y operatividad de ciertos esquemas. El tratamiento de voluminosas masas de información exige habilitaciones particulares y una demanda energética que podría dispararse a medida que se incrementa la intrincación de las arquitecturas. A estas consideraciones se suman los insumos materiales requeridos para la producción de chips, centros de cómputo y equipamientos complementarios. Así pues, cuantificar el impacto ecológico de la IA demanda contemplar no solo el fluido eléctrico consumido en su operatividad, sino también la manufactura de las estructuras que posibilitan su ejecución (Castillo et al., 2026).

Las redes de telecomunicaciones representan otra infraestructura fundamental para la metamorfosis digital. Antenas junto a estaciones base, cableado, dispositivos de transmisión, soluciones de almacenamiento y otros elementos posibilitan el traslado de datos entre individuos y los centros de datos. Su operación demanda energía constante y cuidado de aparatos esparcidos geográficamente. El crecimiento del volumen de datos podría ocasionar demandas masivas de capacidad y de renovación tecnológica. La efectividad energética de las redes, así como la longevidad de sus partes, son, consecuentemente, determinantes clave en su impacto ecológico.

La elaboración de aparatos electrónicos forma una porción notable del rastro material de la digitalización. Computadoras, teléfonos inteligentes, servidores, sensores, equipos de telecomunicaciones y otras cosas exigen abundantes minerales y materiales en su génesis. La minería y el tratamiento de estas fuentes propician repercusiones sobre la vida silvestre, la energía consumida y las existencias de materiales primordiales. Adicionalmente, las redes globales de proveedores pueden desplazar una cuota considerable de estas secuelas a las zonas donde se explotan o transforman los elementos. El análisis de la mutación digital necesariamente debe abarcar estas fases y no acotarse solamente al gasto de energía al emplear el artefacto.

El gasto de energía forma una de las facetas cruciales de la marca digital. Aunque aparatos concretos consumen poquísimo, juntando millones de equipos enganchados a redes, servidores y espacios de memoria, se logra un apetito bastante grande. El asunto climático de semejante consumo en gran parte está supeditado al tipo de fuente de energía que se use. Si la corriente eléctrica sale de combustibles que cargan carbono, el expandir la columna vertebral digital resulta en un aumento de emisiones indirectas. Lo opuesto

sucede si dicha columna está alimentada por fuentes que liberan poco carbono; ahí se rebaja mucho esta presión.

La digitalización, consecuentemente, engendra un desafío mayúsculo en torno a los desechos electrónicos. La remplazó constante de terminales, ordenadores, servidores, equipos de red y variados gadgets tiende a acortar la vida útil de las mercancías y magnificar el cúmulo de desechos. Dichos desechos ostentan elementos recuperables, pero a la par incluyen partes que exigen manipulación experta. Un manejo inadecuado corre el riesgo de ocasionar merma de sustancias apreciables y polución ambiental. UNCTAD recalca que el progreso de la esfera digital viene aparejado a una proliferación de residuos electrónicos, proponiendo la urgencia de transitar hacia paradigmas de economía digital de índole más circular (Castillo et al., 2026).

Los minerales críticos exhiben otra faceta estratégica inherente a la metamorfosis digital. Innumerables aparatos y ensamblajes tecnológicos descansan en minerales esenciales para baterías, circuitos, artilugios electrónicos, almacenamiento de energía y vertientes tecnológicas de vanguardia. La pujante apetencia digital amenaza con exacerbar las tensiones sobre tales yacimientos, desencadenando peligros asociados a su accesibilidad, a la acotada dispersión geográfica de su génesis y a una ineludible subordinación a ciertas redes de abasto. Desde una óptica económica, esta dependencia pudiera gestar vulnerabilidad ante faltas de provisión y fluctuaciones de cotizaciones. La circularidad en los ensamblajes y el reintegro de materiales podrían mitigar, en cierta medida, estas presiones.

La huella ambiental digital debe ser analizada bajo una perspectiva de ciclo de vida, contemplando la extracción de materias primas, fabricación, transporte, su utilización y la disposición final. Un dispositivo pudiera ostentar un consumo energético reducido durante su utilización, más generar impactos significativos durante su fabricación. Del mismo modo, una tecnología puede disminuir emisiones en una actividad económica mientras aumenta el consumo de materiales o genera nuevos residuos. El análisis de ciclo de vida permite identificar estas transferencias de impactos y evita evaluar una tecnología exclusivamente por sus beneficios durante la etapa de funcionamiento.

La metamorfosis digital, asimismo, brinda potencial para cobijar bondades ecológicas de forma colateral. Los avances tecnológicos digitales exhiben capacidad de perfeccionar la

eficacia de los esquemas de movilidad, menguar los viajes físicos, perfeccionar las cadenas operativas fabriles, supervisar el gasto de energía eléctrica y promover la asistencia preventiva de equipos. La inteligencia artificial, conjuntamente con el internet de las cosas, tiene el potencial de usar información en vivo para detectar el despilfarro y potenciar la dedicación de los bienes. Aun así, tales ventajas no tendrían que ser aceptadas sin cuestionar si son plenamente superiores a las repercusiones ocasionadas por la arquitectura tecnológica digital. Conviene contrastar las emisiones y los bienes que demandan el establecimiento de una resolución con los efectos adversos que eficazmente logran eludir.

Según (Carvajal-Benavides et al., 2026), un aspecto particularmente importante corresponde a los efectos rebote. Una tecnología puede incrementar la eficiencia de un recurso y, simultáneamente, reducir el costo de utilizarlo, generando un aumento de la demanda. Por ejemplo, una mayor eficiencia de los servicios digitales puede incentivar un mayor consumo de datos, dispositivos y servicios tecnológicos. En consecuencia, la reducción del impacto por unidad de servicio no necesariamente implica una reducción del impacto total. La evaluación ambiental debe considerar estos efectos para determinar si la digitalización produce una disminución neta de las presiones ambientales.

Así como la huella digital, una dimensión económica que tiene que ver con la productividad y competitividad. La digitalización no solamente puede optimizar costos, cadenas de suministro y la gestión de recursos, sino que también requiere inversiones en infraestructura, actualización tecnológica y energía. Por otro lado, la obsolescencia acelerada tiene la potencia de aumentar los gastos ambientales y económicos asociados con la sustitución de equipos. Así pues, las estrategias digitales tendrían que abarcar criterios de durabilidad, separabilidad, la reutilización y una eficiencia energética adecuada. Finalmente, una transformación digital sustentable debe aspirar no solamente a una capacidad tecnológica superior, sino también a una mayor eficiencia en la utilización de los recursos que soportan tal capacidad.

La economía digital circular unifica estas reflexiones a través de tácticas enfocadas a alargar la existencia de aparatos, rescatar partes, reciclar máquinas, optimizar el consumo eléctrico y elevar la rastreabilidad de recursos. La UNCTAD remarca que la mudanza hacia lo digital tiene que contemplar sus exigencias de materiales y la producción de desechos, impulsando esquemas que disminuyan dichas presiones. La circularidad

posibilita, bajo este prisma, una disminución parcial de la necesidad de insumos primarios y preserva el valor económico inherente a la tecnología producida.

La valoración de la huella ambiental concerniente a la transformación digital amerita, en definitiva, ponderar las emisiones, la energía, los materiales, el agua, los desechos y los minerales críticos, viéndolos como dimensiones interconectivas. Ciertas tecnologías digitales podrían ocasionar beneficios sustanciales en un dominio y, al mismo tiempo, imponer presiones en otro. De ahí, que su performance ambiental requiera ser definida a través de una óptica abarcadora y cambiante, contemplando la totalidad de su existencia. Esta evaluación permite distinguir entre tecnologías que realmente contribuyen a reducir impactos ambientales y aquellas cuya eficiencia aparente puede estar acompañada por mayores demandas materiales y energéticas.

3.4. Impactos directos, indirectos y sistémicos

El análisis de las repercusiones ambientales demanda ir más allá de tan solo señalar las consecuencias que afloran de inmediato tras una iniciativa económica o tecnológica. Una acción puede provocar ramificaciones directas en el entorno, pero de igual modo originar repercusiones colaterales a través de alteraciones en las dinámicas mercantiles, los modelos de consumo, las redes de producción y la conducta de los compradores. Sumado a esto, al coexistir estas transformaciones durante lapsos extendidos, podrían manifestar efectos de índole sistémica que difícilmente se achacarían a una única procedencia. Esta mirada cobra singular relevancia al valorar innovaciones digitales, directrices climáticas y métodos para optimizar el uso de recursos.

Las repercusiones de primer orden se alinean con las consecuencias que emergen directamente de la gestación, el empleo o el desecho de una tecnología, un bien o un proceder. En la esfera digital, estas pueden abarcar el requerimiento energético de un centro de datos, los componentes en la fabricación de un aparato o los remanentes resultantes al cabo de su periodo de servicio. Con frecuencia, tales repercusiones se tornan bastante asequibles de delimitar, ya que se advierte un vínculo explícito entre la acción y el resultado ecológico. Su cuantificación conforma la base inicial para estimar la efectividad ecológica de una opción determinada (Li et al., 2021).

Los impactos de primer orden también pueden observarse en procesos industriales y empresariales tradicionales. Una empresa que instala maquinaria más eficiente puede

reducir directamente su consumo energético por unidad producida. Del mismo modo, la sustitución de una materia prima por otra puede modificar directamente la cantidad de residuos generados. No obstante, el mero análisis de esas cifras quizás ofrezca una visión algo restringida. Atenuar un impacto a corto plazo puede acarrear repercusiones inesperadas en etapas posteriores del ciclo, que ameritan consideración antes de determinar el beneficio ambiental final.

Las repercusiones de segundo orden surgen cuando una innovación tecnológica o una táctica económica determinada provoca alteraciones en las conductas de otros participantes del mercado. Un adelanto en el aprovechamiento energético, como muestra, puede reducir el gasto operativo de un servicio específico y, consecuentemente, fomentar un incremento en su demanda. De manera similar, una estructura digital que agilice los intercambios mercantiles podría aumentar el volumen de transacciones, el movimiento de bienes y la demanda global de productos. Esas evoluciones, hay que recalcar, no se encuentran intrínsecamente en la funcionalidad básica del avance o la norma abordada, sino que surgen como resultado de las transformaciones económicas y los cambios en los patrones de conducta que estos estimulan.

Los impactos de segundo orden también pueden manifestarse a través de las cadenas de suministro. La instauración de innovaciones tecnológicas tiene el potencial de disparar el requerimiento de componentes, minerales o servicios particulares. Esta alza podría ser un catalizador para la explotación de recursos y la manufactura en distintas áreas geográficas. Por lo tanto, una estrategia aplicada en un sitio puede repercutir ambientalmente en ubicaciones distantes de su aplicación. El estudio detallado de estas interconexiones nos deja desvelar impactos intrínsecos que permanecen ocultos si el escrutinio se restringe a las gestiones inmediatas de una entidad.

Las consecuencias de tercer grado sugieren transformaciones a gran escala y acumulativas emanando de la intrincada conexión entre diversos agentes, mercados y tecnologías. Pudieran manifestarse alteraciones estructurales en los arreglos de manufactura, consumo, movilidad, trabajo y en el uso de los recursos. El progreso de herramientas digitales para ilustración podría cambiar modelos comerciales completos, afectando también la demanda de ciertos bienes y servicios. Tales desarrollos podrían originar impactos en el medio ambiente, tanto positivos como negativos, que solo se notarán al observar el tejido a lo largo de prolongados lapsos.

Las consecuencias terciarias captan una atención especial para las hojas de ruta de cambio climático. Un conjunto de reglas que promocionen tecnologías de escasa huella de carbono tendrá la capacidad de modificar las bases de inversión corporativas e introducir cadenas de valor innovadoras. Este cambio sería bastante capaz de fortalecer los nichos de energía eólica, almacenaje de energía, vehículos eléctricos y equipamientos de eficiencia. De forma paralela, esta transformación pudiera aumentar la demanda de minerales selectos y componentes. La transición puede producir, por tanto, una redistribución de presiones ambientales entre sectores y territorios, haciendo necesario analizar sus efectos de manera sistémica.

Las repercusiones sustitutivas surgen cuando un artefacto, una mercadería o un procedimiento releva otro. La sustitución podría originar provechos ecológicos cuando el esquema innovador demanda decreciente potencia, materias primas o efluvios para brindar un servicio parejo. No obstante, el desenlace yace en las especificidades de las dos opciones y de la totalidad de su trayecto útil. Un artificio presuntamente más puro podría precisar mayores porciones de elementos a lo largo de su manufactura o suscitar perjuicios vinculados con su retiro postrero. En consecuencia, la sustitución debería ser enjuiciada mediante un cotejo completo y no solamente por un parámetro medioambiental (Li et al., 2021).

Los efectos de sustitución también pueden modificar la estructura de la demanda. La digitalización de determinados servicios puede reducir el consumo de materiales físicos, pero aumentar el uso de infraestructura digital. Las reuniones virtuales pueden disminuir determinados desplazamientos, mientras que simultáneamente requieren centros de datos, redes y dispositivos. Estos ejemplos muestran que la sustitución no implica necesariamente la eliminación del impacto ambiental, sino una posible redistribución entre diferentes categorías. La evaluación integrada permite determinar si el cambio genera una reducción ambiental neta.

La intensificación de los efectos acontece cuando alguna tecnología, pues, posibilita la elevación en la cuantía, la presteza o la recurrencia de alguna faceta mercantil. Una eficiencia mejorada dentro de un procedimiento determinado es capaz de mermar los insumos que se precisan por cada unidad elaborada. Paralelamente, esto posibilita expandir considerablemente el total del volumen de lo que se fabrica. Si ese ascenso en la actividad traspasa las ganancias de la eficiencia que se consiguieron, el perjuicio

ecológico general podría ser más grande. Tal situación demuestra ser especialmente atinada en aquellos esquemas de producción donde los avances tecnológicos repercuten en la disminución de los costes y propician una pronta expansión en el ámbito comercial.

El efecto rebote constituye una expresión particularmente importante de esta relación entre eficiencia y consumo. Una mejora en la eficiencia desencadena un fenómeno: al disminuir el costo efectivo del uso de un recurso, paralelamente su demanda tiende a escalar. La ganancia ambiental inicial derivada de la eficiencia se ve, a veces, mermada por esa expansión del consumo. Dependiendo de las circunstancias, esta repercusión se manifiesta bien en un uso más intensivo del producto, o bien, de forma indirecta, al reinvertirse los ahorros generados en otros bienes y servicios, que a su vez acarrearán sus propias huellas ecológicas.

Los efectos de rebote se manifiestan en su forma directa o indirecta o aun abarcando la totalidad del sistema económico. Una innovación tecnológica capaz de aminorar el gasto energético en un artefacto puede fomentar una utilización prolongada; los beneficios monetarios surgidos de esta eficacia serán luego redirigidos hacia diferentes gastos; y en un nivel superior, una disminución en los gastos podrá potenciar el crecimiento de específicos sectores productivos. Consecuentemente, las pautas dirigidas a la optimización del rendimiento habrán de incluir no solo el gasto por unidad manufacturada, sino igualmente la evolución global del consumo.

La interconexión entre las repercusiones iniciales, secundarias y terciarias evidencia que las infraestructuras ecológicas y las de índole económica operan a través de vinculaciones recíprocas. Cierta determinación corporativa puede repercutir en los suministradores, en los usuarios, en los mercados de materias primas y en los modelos de ingesta, propiciando efectos que se propagan muy por encima del epicentro de la resolución adoptada. El análisis sistémico permite identificar estas conexiones y evaluar posibles transferencias de impactos entre sectores, territorios y períodos de tiempo. Esta perspectiva resulta fundamental para evitar que una solución ambientalmente favorable en un punto específico produzca consecuencias negativas en otra parte del sistema (Kumar et al., 2025).

Evaluar las repercusiones implica la conjunción de metodologías como el análisis del ciclo de vida, modelaciones económicas, el escrutinio de escenarios, indicadores ambientales y bases de datos. Entender las tecnologías permite divisar las influencias

directas mientras las proyecciones económicas nos ayudan a mensurar cambios en el valor, la demanda y la productividad. El análisis prospectivo ayuda a escudriñar cómo las consecuencias pudieran desplegarse a futuro bajo varios escenarios. Al juntar estas herramientas, creamos una perspectiva más completa de las secuelas ecológicas y comerciales vinculadas a las transformaciones tecnológicas.

Un análisis exhaustivo de las repercusiones inmediatas y también de las derivadas e interconectadas resulta más eficaz para dilucidar si un proceder se traduce, en efecto, en progreso ambiental. Una mera aminoración de las emisiones, de los residuos o del consumo energético por unidad no es, por sí sola, prueba fehaciente de que el impacto total vaya a disminuir. Se torna imprescindible escrutar las intrincadas cadenas de producción, las alteraciones en el comportamiento humano, los impactos de sustitución, la intensificación de ciertas actividades y las posibles reacciones adversas. Al adoptar esta metodología, las transformaciones ecológicas y técnicas se pueden evaluar bajo una luz de movimiento perpetuo, entendiendo que los resultados de estos cambios dependen íntimamente de las interrelaciones que existen entre la producción, el consumo, las herramientas disponibles, la economía y la propia naturaleza.

Figura 3.2. *Componentes e Indicadores Principales de la Huella Ambiental*



Elaboración: Autores

3.5. Índice de Huella Ambiental Dinámica

El Índice de Huella Ambiental Dinámica (IHAD) puede plantearse como una herramienta metodológica destinada a integrar diferentes dimensiones de presión ambiental dentro de un único sistema de evaluación. Su formulación propuesta se expresa como $IHAD = f(\text{CO}_2\text{e} + \text{energía} + \text{agua} + \text{materiales} + \text{residuos} + \text{vulnerabilidad climática})$. A diferencia de una métrica estática que meramente capta la coyuntura ambiental de un lapso concreto, el matiz dinámico inherente al índice posibilita la examinación de la progresión de los impactos y su nexo con las mutaciones económicas, tecnológicas y climáticas. Bajo esta perspectiva, el rendimiento ambiental deviene susceptible de escrutinio como un proceso intrínsecamente mutable a lo largo del tiempo.

La dimensión inicial alude a la liberación de gases que causan el efecto invernadero, cuantificada por lo común en su equivalencia al dióxido de carbono (CO_2e). Por medio de este elemento es posible discernir la influencia de una operación, una entidad corporativa o una demarcación geográfica en lo que respecta al calentamiento global. Cabrían aquí las emanaciones directas, aquellas que surgen de los quehaceres cotidianos, y también las indirectas, ligadas a la energía eléctrica, al desplazamiento y a las redes de distribución, todo esto supeditado a los límites que se establezcan. Su inclusión faculta la correlación entre la actividad mercantil y el estrés que padece el clima, si bien es imperativo añadir las otras facetas para prevenir que el examen se remita únicamente a los efectos del carbono.

El componente de energía permite medir la cantidad y características de los recursos energéticos utilizados para desarrollar una actividad. Entre los indicadores posibles pueden incluirse consumo energético total, consumo por unidad producida, intensidad energética y participación de fuentes renovables. La eficiencia energética puede reducir costos operativos y disminuir determinadas emisiones, pero su efecto ambiental depende también del origen de la energía utilizada. Por ello, el IHAD puede considerar simultáneamente la cantidad de energía consumida y su intensidad ambiental, permitiendo diferenciar entre distintos patrones de utilización energética (He et al., 2024).

La dimensión de agua incorpora la presión ejercida sobre los recursos hídricos. En el análisis de las problemáticas hídricas es posible incorporar parámetros tales como el gasto de agua, la severidad del uso de recursos hídricos, la cuantía de agua reciclada y la presencia en áreas con limitaciones de este vital líquido. Integrar la variable hídrica

permite identificar posibles conflictos entre producción económica y disponibilidad de recursos naturales, especialmente en sectores agrícolas, industriales y urbanos.

La dimensión de materiales persigue ilustrar la cuantía de recursos naturales que requiere una actividad económica específica para subsistir. Aquí se contempla la incorporación de materias primas primigenias, componentes secundarios, minerales, materia vegetal y demás entradas pertinentes. Los indicadores que pudieran abarcar son el consumo de material por unidad producida, el tanto por ciento de materiales reciclados, la intensidad material y la dependencia respecto a materias primas cruciales. Con esta dimensión se hace posible relacionar el IHAD con las nociones de la economía circular, dado que un decrecimiento en el uso de materiales vírgenes y un incremento en la empleabilidad de recursos recuperados tienen el potencial de mitigar la carga ambiental inherente a su extracción.

La generación y gestión de desechos conforman una dimensión fundamental. El índice puede incluir la cuantía total de desechos creados, desechos peligrosos, desechos enviados a destino final y el porcentaje de materiales valorizados o recuperados. No todos los desechos comparten la misma relevancia ambiental, pudiéndose instituir categorías según sus atributos y potencialidades de utilidad. La integración de esta variable posibilita discernir si las mejoras productivas verdaderamente disminuyen la creación de desechos o simplemente mudan los efectos hacia las fases ulteriores del ciclo de vida.

La vulnerabilidad climática distingue al IHAD de indicadores ambientales tradicionales al contemplar la exposición de una entidad o región a peligros que provienen del cambio climático. Esta medida, con frecuencia, evalúa elementos tales como la susceptibilidad a crecidas de agua, periodos de sequía, rangos de temperatura no habituales, la escasez hídrica y la reiteración de acontecimientos climáticos hostiles. Aún más, la determinación puede integrar métricas relativas a la infraestructura existente, las aptitudes institucionales y los medios materiales con que se cuenta para hacer frente a dichos peligros. Así, dos territorios con niveles similares de emisiones y consumo de recursos podrían obtener diferentes resultados si presentan capacidades de adaptación significativamente distintas (He et al., 2024).

La construcción del índice requiere seleccionar indicadores ambientales, económicos y tecnológicos que representen adecuadamente cada dimensión. Las variables ambientales

pueden incluir emisiones, energía, agua, materiales y residuos, mientras que las económicas pueden incorporar producción, valor agregado, costos ambientales, inversión y productividad de recursos. Las variables tecnológicas pueden considerar eficiencia de equipos, digitalización, sistemas de monitoreo, utilización de sensores o capacidad de procesamiento de información ambiental. Esta combinación permite relacionar la presión ambiental con las características económicas y tecnológicas del sistema evaluado.

Porque las métricas se exhiben en distintivos marcos unitarios, deviene indispensable ejecutar métodos de estandarización, los cuales posibiliten su traslado a un denominador compartido. Una alternativa posible acarrea la mutación de cada elemento a proporciones vacilando entre el cero y la unidad o situándose en el rango de cero a cien. Aquellos indicadores donde una cifra ampliada presagia una mayor exigencia ecológica han de ser sometidos a un metamorfoseo opuesto en contraste con aquellos donde un guarismo superior refleja una performance más favorable. La adecuación estandarizada habrá de verificarse con un criterio uniforme para prevenir que las disparidades métricas infundan de modo ficticio la conclusión postrera del índice.

Las ponderaciones posibilitan precisar el grado de relevancia de cada dimensión conformando el IHAD. Inicialmente, se puede considerar la asignación de pesos análogos; de esta forma, carbono, energía, agua, materiales, residuos y la vulnerabilidad climática comparten por igual su contribución. Alternativamente, la utilización de enfoques multicriterio o la consulta a especialistas y, asimismo, técnicas estadísticas pueden determinar ponderaciones que varían con el contexto específico. A modo de ilustración, en el sector industrial de uso intensivo de agua la esfera hidráulica podría obtener una mayor asignación de peso. El acto de elegir los pesos requerirá una justificación fundamentada y, además, estará sujeto a estudios de sensibilidad con el fin de verificar la robustez de las conclusiones.

La naturaleza temporal se configura como una de las bases primordiales del IHAD. Se puede hallar el índice para una diversidad de anualidades, épocas o modelos predictivos, habilitando el examen de si el rastro ecológico deviene mayor, descende o se altera en su configuración. Una entidad sería capaz de menguar sus exhalaciones mientras que sus abastos materiales van al alza o decantar sus desechos en tanto que su apetencia energética se expande. La observación temporal facilita el reconocimiento de estas metamorfosis y

la dilucidación de si se asiste a una optimización ambiental exhaustiva o simplemente a una permuta de coacción entre diversos planos.

El IHAD puede implementarse en diversas organizaciones. Entre ellas figuran compañías, gobiernos locales, metrópolis, áreas manufactureras e inclusive territorios amplios. Es fundamental adaptar los indicadores particulares para cada contexto. En el ámbito empresarial, su utilidad se centra en evaluar los procesos de producción y las cadenas de suministro. Un municipio puede observar aspectos como el consumo eléctrico, la gestión de desechos, el manejo del líquido vital y la vulnerabilidad frente a las inclemencias del tiempo. En tanto se abarca un espacio geográfico, se enlazan factores definitorios con la estructura de producción, las dotaciones de infraestructura presentes y las contingencias meteorológicas. Esa capacidad de adaptación, por ende, faculta al índice para actuar como un dispositivo de identificación, seguimiento y comparación.

El IHAD podría ser enriquecido por análisis de escenarios con el fin de estimar la potencial modificación de las huellas ambientales. Un escenario que refleje la prolongación de las tendencias actuales podría ser contrastado con otros que integren la economía circular, la eficiencia energética, la digitalización o bien la adaptación climática. Esta comparación facilitaría discernir qué estrategias resultan en reducciones significativas de la presión ambiental y cuáles, por el contrario, generan efectos colaterales. De esta suerte, el índice asume una función de anticipación, adicional a su rol descriptivo.

A juicio de He y colegas (2024), la adopción de un Índice de Huella Ambiental Dinámica posibilita una transición desde una evaluación sustentada en parámetros ambientales inconexos hacia un escrutinio multidimensional y diacrónico. Al integrar de manera sinérgica CO₂e, energía, recursos hídricos, materiales, desechos y la susceptibilidad al clima, se edifica una perspectiva holística de los embates ecológicos inherentes a las operatorias económicas. Al integrar variables económicas y tecnológicas, el IHAD puede utilizarse para evaluar no solamente cuánto impacto genera un sistema, sino también cómo evoluciona, qué factores explican sus cambios y qué alternativas pueden conducir hacia trayectorias de menor presión ambiental.

3.6. Modelización prospectiva del impacto ambiental

La modelación prospectiva del impacto ambiental posibilita escrutar la potencial evolución de las presiones ambientales en escenarios de diversas circunstancias económicas, tecnológicas y climáticas. Distinto a una evaluación apoyada solo en datos históricos, este abordaje prospectivo recurre a la información al alcance para erigir posibles devenires futuros. Su propósito trasciende la predicción de un desenlace singular con absoluta certeza; más bien, su objeto es el cotejo de disyuntivas y la aprehensión de las repercusiones emanadas de variadas determinaciones. Dicha metodología demuestra particular valía donde proliferan altos grados de imprecisión concernientes al crecimiento económico, la gestación tecnológica, los lineamientos medioambientales y el abasto de recursos.

La trayectoria tendencial refleja un camino donde las circunstancias predominantes hoy persisten en su curso sin alteraciones estructurales notorias. Se pueden sopesar los ritmos pasados de avance, esquemas de uso energético establecidos, la creación de desechos, el aprovechamiento de recursos y la emisión de contaminantes. Dicho planteamiento opera como punto de anclaje para contrastar las distintas opciones planteadas. Su valía se encuentra en evidenciar aquello que pudiese suceder de no introducirse mutaciones relevantes en las normativas, métodos o esquemas de producción. No implica con certeza el porvenir de mayor verosimilitud, sino un umbral inicial para cotejar las repercusiones de diversas estrategias.

La edificación del escenario tendencial implica la identificación de las variables económicas y ambientales fundamentales que explican el comportamiento sistémico. Estas pueden abarcar el crecimiento del Producto Interno Bruto, demografía, producción manufacturera, requerimientos energéticos, la demanda de agua, la generación de desechos y emisiones. Adicionalmente, se incorporan dinámicas tecnológicas y mutaciones en los hábitos de consumo. A partir de estas variables se pueden establecer relaciones estadísticas o econométricas que permitan proyectar su evolución. La calidad del escenario dependerá frecuentemente de qué tan completa sea la información disponible y de la capacidad del modelo para denotar las conexiones naturales entre las variables analizadas (Cedeño-Hidalgo et al., 2019).

La idea central de la economía circular pone su foco en rediseñar los procesos a fin de reducir la extracción de recursos y mantener los elementos en ciclos de producción sin

fin. Ello plantea mejoras notables en lo que concierne a la reutilización, reparación, reconstrucción, empleo de materiales primas recicladas, y una reducción drástica de desechos. En este marco conceptual, el avance económico se concibe bajo una administración de materiales optimizada. Se pretende dilucidar en qué magnitud las metodologías circulares son capaces de modificar los requerimientos de recursos y mitigar la huella ambiental inherente a la producción.

El modelo circular, a su vez, admitirá transformaciones en los modelos de negocios y en los esquemas de consumo. A medida que proliferan los servicios de reparación, arriendo, restauración y el Product-as-a-Service, la urgencia de generar incesantemente artefactos nuevos puede mermar. Tales variaciones resultan en la posibilidad de alterar el vínculo entre el desenvolvimiento económico y el empleo de materiales. No obstante, es imperativo que este esquema ponderare las probables repercusiones rebote, dado que una aminoración en el valor de ciertas prestaciones podría, inversamente, amplificar la demanda. La evaluación prospectiva permite determinar si los beneficios derivados de la circularidad son suficientes para reducir la presión ambiental total.

La escena digital vislumbra una ampliación considerable de herramientas de punta, tales como la inteligencia artificial, el internet de las cosas, la automatización, el big data, la computación en la nube y aquellos sistemas de manejo inteligente. Tales innovaciones tienen la capacidad de potenciar la productividad de los procesos manufactureros, perfeccionar la atención a los bienes, mitigar la generación de desechos y, a su vez, ajustar la utilización de la energía y los insumos. Paralelamente a esto, se demandan redes digitales adecuadas, equipos operativos, energía eléctrica y recursos minerales. Por lo tanto, esta perspectiva ha de sopesar al unísono las ventajas obtenidas de la transformación digital y la huella ecológica ligada a su propagación.

La modelización del escenario digital requiere incorporar variables relacionadas con la infraestructura tecnológica. Pueden considerarse cantidad de dispositivos conectados, capacidad de centros de datos, consumo energético digital, utilización de redes y generación de residuos electrónicos. También pueden incluirse indicadores de productividad y eficiencia ambiental generados por las tecnologías. Esta estructura permite estimar si la expansión digital produce una reducción neta de impactos o si el crecimiento de la infraestructura tecnológica compensa parcialmente las ganancias de eficiencia.

De acuerdo con Cedeño-Hidalgo et al. (2019), el escenario circular-digital combina las transformaciones de ambos enfoques. La digitalización puede proporcionar información necesaria para mejorar la trazabilidad de materiales, predecir fallas, optimizar inventarios y coordinar mercados secundarios. Los sensores pueden identificar el estado de los productos, mientras que la inteligencia artificial puede determinar cuándo repararlos, reutilizarlos o recuperarlos. La combinación de ambas estrategias permite analizar una economía circular apoyada en sistemas de información capaces de anticipar pérdidas de recursos y mejorar la toma de decisiones.

En este escenario resulta fundamental evaluar las sinergias y posibles contradicciones entre circularidad y digitalización. Una plataforma digital posibilita la reutilización de productos; sin embargo, precisa de una infraestructura tecnológica que demanda energía y materiales. Por ende, un sistema de trazabilidad contribuye a la recuperación de recursos aun cuando genera costos adicionales de implementación y sostenimiento. La modelización deberá precisar si las ganancias circulares compensan las implicaciones vinculadas a la infraestructura digital. Lo anterior evita la asunción automática de la digitalización como una solución ambiental.

La transición sustentable dibuja un panorama de metamorfosis extensiva, conjugando la mitigación del clima, la economía circular, la eficacia energética, avances tecnológicos y la acomodación. Podría enmarcar variaciones en la composición energética, decrecer emisiones, una gestión hídrica proactiva, la valorización de materiales, infraestructuras adaptables y sistemas digitales de fiscalización. Con este escenario se desentraña una mutación estructural del sistema productivo, mas no apenas la adopción de una herramienta o directriz solitaria. Su finalidad es representar una trayectoria en la que diferentes estrategias ambientales se desarrollan de manera coordinada.

El análisis comparativo de escenarios puede llevarse a cabo empleando métricas como emisiones de CO_{2e}, requerimientos energéticos, la profusión en el uso de materiales, la demanda hídrica, el volumen de residuos generados, así como la productividad y los gastos inherentes. De igual modo, sería provechoso integrar aspectos relativos a la inversión efectuada, el mercado laboral, la competitividad en el sector y la susceptibilidad ante el cambio climático. De este modo, la valoración trasciende la mera identificación del escenario con la menor huella ambiental; posibilita una disección profunda de los costos y dividendos económicos ligados a cada alternativa. Dicha confrontación a través

de múltiples dimensiones propicia desvelar estrategias que manifiestan un balance armónico entre la eficacia ecológica y la factibilidad financiera.

La modelización se puede nutrir de modelos econométricos, análisis de ciclo de vida, dinámica de sistemas, modelos de equilibrio económico y, además, de técnicas de aprendizaje automático. Al aplicar enfoques metodológicos heterogéneos, proyectamos luz sobre las intrincadas capas que constituyen el tejido interconectado del dominio económico, el progreso tecnológico y nuestro hábitat natural. Los modelos econométricos resaltan como herramientas perspicaces para evaluar las asociaciones históricas entre distintas variables, mientras que la dinámica de sistemas ofrece, por otra parte, una apreciación clara de la influencia mutua de los componentes en un sistema, develando así sus ciclos de retroalimentación. Sumado a esto, el análisis de ciclo de vida se hace indispensable para considerar las huellas ambientales ligadas a cada etapa del ciclo de producción y consumo. El aprendizaje automático, como complemento, destaca por su habilidad para manejar cantidades ingentes de datos, permitiendo así mejorar predicciones específicas (Sacchi et al., 2022).

La construcción de escenarios debe incorporar, además, incertidumbre y análisis de sensibilidad. Las estimaciones resultantes están naturalmente sujetas a los supuestos asumidos respecto a los precios de la energía, el crecimiento económico, el impulso de nuevas ideas, las políticas públicas y los cambios en la conducta del público. Las modificaciones en cualquiera de estos supuestos previos pueden originar resultados bastante distintos. Por ello, es conveniente construir escenarios alternativos y analizar cómo responden los resultados ante cambios en las variables principales. Esto permite evitar interpretaciones deterministas y proporciona a los responsables de decisiones información sobre los rangos posibles de resultados.

La comparación de escenarios permite transformar la evaluación ambiental en una herramienta de planificación estratégica. En lugar de solamente determinar las consecuencias de ahora, se puede dilucidar qué elecciones orquestan derroteros de menor impacto ambiental y robustez incrementada. Una entidad puede contrastar, sin ir más lejos, el desenlace de perpetuar su tecnología presente versus apostar por esquemas circulares, la digitalización o la optimización energética. Los estados-nación pueden servirse de una metodología análoga para escudriñar directrices públicas y establecer qué acoplamientos de acciones propician descollantes efectos ecológicos y financieros.

La modelización prospectiva resulta de suma importancia en la integración del cambio climático, la economía circular y la transformación digital. Cada dimensión influye en el devenir de las otras, produciendo potencialmente efectos benéficos o perjudiciales. Los escenarios posibilitan la visualización de estas dinámicas y la valoración de trayectorias futuras antes de comprometer capital o ejecutar estrategias. Su principal valor radica en prever repercusiones, descubrir contingencias y ventajas, y ofrecer un marco numérico para guiar determinaciones hacia vías de transición con reducida huella ecológica y mayor sostenibilidad económica.

Figura 3.3. Fases del Proceso de Modelización Prospectiva para la Gestión Ambiental



Elaboración: Autores

3.7. Capacidad adaptativa y resiliencia ambiental

La aptitud de adaptación se erige como un pilar esencial en la elucidación del comportamiento de las esferas económica, social y natural ante los embates del cambio climático. Las amenazas climáticas no se presentan del mismo modo para todos los ámbitos geográficos, las corporaciones o los colectivos; ello se atribuye a divergencias en la infraestructura, los activos monetarios, la pericia técnica, los marcos normativos y la disponibilidad de datos. Por consiguiente, la capacidad de amoldarse implica la virtualidad de anticipar, responder y ajustar frente a transformaciones ambientales. El afianzamiento de la misma facilita la reducción de agravios inherentes y la salvaguarda

de la operación esencial de los conjuntos ante contextos de elevada inestabilidad climática.

La fragilidad climática nace de la entrelazada dinámica entre la exposición, la susceptibilidad y la facultad de adaptación. Un espacio geográfico podría mostrar una alta exposición a eventos tales como desbordamientos de ríos, periodos secos o temperaturas excesivas; no obstante, presenta variados niveles de fragilidad conforme a su contexto socioeconómico. La disponibilidad de obras adecuadas, sistemas de salud fuertes, recursos monetarios y organizaciones estables tiene como consecuencia una mitigación importante de los efectos de un peligro. Como se mencionó antes, la evaluación del entorno debe abarcar no solo la posibilidad de un suceso climático, sino también los elementos que definen la magnitud de las secuelas.

En el ámbito financiero, la fragilidad podría manifestarse por una caída de los bienes materiales, la producción, los puestos de trabajo y las proyecciones económicas. Un evento de inundación resulta capaz de impactar instalaciones destinadas a la producción, aniquilar infraestructura y propiciar rupturas en las cadenas de suministro. La prolongación de una sequía, por otro lado, es susceptible de mermar la producción agrícola, elevar los costos de ciertos insumos y ejercer una presión inflacionaria sobre los precios. Aquellas empresas y territorios que exhiban una menor resiliencia financiera encontrarán probablemente mayores obstáculos para su restablecimiento ulterior a tales sucesos. En este contexto, la capacidad adaptativa opera como un sistema que posibilita aminorar la cuantía y el lapso de las deficiencias económicas (Carvajal, et al., 2026).

La infraestructura resiliente figura como una de las herramientas primordiales para la adaptación. Se asevera que carreteras, redes eléctricas, sistemas hídricos, edificaciones y canales de comunicación deben ser concebidos bajo la premisa de circunstancias climáticas actuales y venideras. Podría decirse que la erogación monetaria en infraestructuras de mayor resistencia suele acarrear desembolsos iniciales superiores; empero, la mitigación de damnificaciones e interrupciones a posteriori resulta considerable. Atendiendo a un enfoque de valoración económica, estas asignaciones de capital han de ser escrutadas, ponderando no solo el desembolso de su edificación, sino de igual modo los beneficios que emanan de la anulación de detrimentos venideros, la salvaguardia de la procreación continuada y la mengua de erogaciones para su restauración.

La resiliencia también está intrínsecamente ligada a la diversificación tanto de los sistemas productivos como de las cadenas de suministro. Es más, una organización cuya operación pivota sobre un único proveedor, una única fuente de energía o una ruta logística específica podría exhibir una exposición desproporcionada ante eventuales interrupciones causadas por factores climáticos. Implementar la diversificación de proveedores, la adopción de fuentes energéticas alternativas y el desarrollo de robustos mecanismos de almacenamiento resulta instrumental en la mitigación de tal vulnerabilidad. Si bien las estrategias económicas apuntan a una escalada en desembolsos operativos durante la fase primaria, es verdad, sin embargo, que proyectan un aumento considerable en su robustez ante contingencias venideras.

La inteligencia ambiental eleva la fortaleza adaptable. Un torrente incesante de información, procesado con exactitud, alimenta esta facultad de ajuste. Herramientas múltiples, como sensores y miradores satelitales y geográficos, unidos a la IA, son pilares cruciales. Ellos hacen posible discernir mutaciones ambientales, produciendo así insumos cruciales para la deliberación. Se incorporan datos de precipitación, grados de temperatura, reservas de agua, la pureza del aire o las características edáficas. Al entrelazar la información medioambiental al instante, se logran identificar escenarios de peligro con una previsión acrecentada, dirigiendo así los medios hacia los focos de mayor fragilidad.

La gestión de recursos en crisis encuentra un aliado significativo en los sistemas digitales. Las plataformas informativas, en verdad, fomentan la armonización entre instituciones, empresas y colectividades, mientras que los sistemas de geolocalización permiten definir zonas afectadas. Asimismo, la inteligencia artificial procesa volúmenes masivos de datos para identificar patrones y anticipar el curso de peligros particulares. Sin embargo, tales sistemas demandan una base tecnológica sólida, una conexión fiable, información veraz y facultades institucionales bien cimentadas. Así pues, la digitalización de las estrategias de adaptación demanda complementarse con esquemas que aseguren la permanencia, veracidad y apertura del acceso a la información. Aquellas zonas de mayor fragilidad.

Los sistemas de alerta temprana configuran una manifestación palpable de la inteligencia ambiental orientada a la mitigación de riesgos. Su arquitectura engloba la convergencia de datos meteorológicos, hidrológicos, geográficos y sociales junto a modelos predictivos diseñados para discernir escenarios de peligro inminente. Un aviso emitido con antelación

temporal factible permitirá la reubicación de individuos, la protección del patrimonio, la alteración de operaciones económicas o la agilidad de las entidades de auxilio. El rendimiento efectivo de estas infraestructuras se fundamenta no solo en la aptitud técnica para identificar riesgos, sino, además, en el robustecimiento de políticas organizacionales y vías adecuadas para la propagación y ejecución de las alertas.

Además, la adaptación precisa ponderar las particularidades de cada región geográfica y su quehacer económico. Las demandas de un área de cultivo susceptible a sequías se distancian de las de una urbe amenazada por anegaciones o una manufactura asentada en el litoral. Deben ajustarse los índices de aptitud adaptativa a estos contextos, sopesando rubros como cimentación, recurso hídrico, acceso a crédito, innovación, utilidad pública y potencia gremial. Esta diferenciación evita aplicar estrategias generales que podrían resultar poco eficientes frente a riesgos específicos (Carvajal et al., 2026).

La resiliencia ambiental trasciende la mera restauración de estados previos a una alteración. En rigor, abarca la transformación del sistema con el fin de mitigar su exposición a amenazas venideras. Una urbe asolada por inundaciones, supongamos, podría rehacer sus infraestructuras bajo idénticos parámetros que antaño o, alternativamente, integrar novedosos dispositivos de drenaje, salvaguardas espaciales y dispositivos de supervisión. Tal optativa posterior, además de restablecer la aptitud menoscabada, incrementa la capacidad de reacción frente a contingencias subsecuentes. De esta manera, la adaptación puede devenir en una coyuntura para el engrandecimiento de las condiciones estructurales del ente.

El éxito en la adaptación también está condicionado por la buena gobernanza y el acceso a fondos necesarios. Desarrollar estrategias de adaptación, por lo tanto, precisa de una cuidadosa planificación, armonía institucional y formas efectivas de movilizar capital. Sin duda, las autoridades locales requieren información y herramientas para diagnosticar áreas vulnerables; paralelamente, el sector empresarial exige estímulos y un entorno favorable para desembolsar fondos en infraestructuras robustas. Intervenciones de política pública pueden ser cruciales, implementando ordenamiento territorial, expandiendo infraestructuras, creando seguros robustos, activando fondos climáticos y estableciendo sistemas para el traspaso de riesgos. La colaboración entre distintas entidades se vuelve indispensable ante impactos climáticos que exceden la competencia individual de cualquier actor.

La resiliencia socioambiental integra la dimensión social en la adaptación. Individuos de bajos recursos, con acceso escaso a servicios o alta dependencia de la naturaleza, experimentan repercusiones desmesuradas ante ciertas contingencias climáticas. La aptitud para adaptarse debe ponderar el acceso a datos, elementos esenciales, formación, bienestar y sistemas de amparo colectivo. Una táctica eficaz ambientalmente resulta insuficiente si ignora las circunstancias sociales de quienes han de ponerla en práctica o sobrellevar sus secuelas.

De acuerdo con Sandoval et al. (2023), la evaluación de la capacidad adaptativa puede incorporar indicadores relacionados con infraestructura, tecnología, recursos económicos, instituciones, información y exposición climática. Estos indicadores pueden normalizarse y combinarse para construir sistemas de medición comparables entre empresas o territorios. La utilización de indicadores permite identificar fortalezas y debilidades y establecer prioridades de inversión. Asimismo, el seguimiento temporal permite determinar si las medidas implementadas están reduciendo efectivamente la vulnerabilidad o si aparecen nuevos riesgos como consecuencia de cambios climáticos, económicos o tecnológicos.

La convergencia de inteligencia ambiental, infraestructura robusta y sistemas de alerta precoz posibilita transitar de un manejo reactivo a uno preventivo ante riesgos. Más que aguardar la manifestación de un evento para desplegar esfuerzos, las plataformas de información son capaces de detectar indicios incipientes y arbitrar estrategias de respuesta. Dicha metamorfosis conlleva trascendentales repercusiones económicas, dado que la proactividad puede mitigar gastos de reconstrucción, ceses productivos y detrimentos sociales. Consecuentemente, la adecuación se erige como inversión propensa a salvaguardar la aptitud productiva y el estado de bienestar frente a las circunstancias climáticas venideras.

La capacidad adaptativa y la resiliencia ambiental finalmente deben ser comprendidas como procesos dinámicos. Las condiciones climáticas van cambiando, las tecnologías evolucionan y las estructuras económicas se transfiguran, de tal forma que una estrategia acertada en el presente pueda mostrarse insuficiente en un futuro. Un fortalecimiento de la resiliencia precisa de un monitoreo constante, actualización de la infraestructura, creación de conocimiento y aprendizaje en el ámbito institucional. La amalgama de datos ambientales, innovación tecnológica, planeación económica y sistemas de alerta

posibilita el desarrollo de facultades para prever perturbaciones y atenuar la vulnerabilidad de los sistemas socioeconómicos ante el cambio climático.

3.8. El principio de neutralidad ambiental digital

El postulado de neutralidad ambiental digital se erige sobre una idea central: una tecnología no debería reputarse favorablemente para el medio ambiente tan solo por facultar una disminución de un cierto impacto en una faena económica. Evaluar si una resolución digital confiere una ganancia ambiental genuina demanda cotejar las afecciones que genera a lo largo de su existencia completa frente a las afecciones que propicia soslayar. Dicha perspectiva asume una importancia particular dada la ubicua proliferación de la inteligencia artificial, la red de objetos conectados, los núcleos de procesamiento de datos y los andamios digitales. Si bien la digitalización podría fomentar una mayor proficiencia en el manejo de recursos, también cabe la posibilidad de que suscite nuevas apetencias por energía y materias primas.

Ciertamente, una tecnología deviene propicia para el medio ambiente, asumiendo que ostenta la capacidad de originar una disminución tangible y contrastable en las repercusiones ecológicas, si lo comparamos con un parámetro preestablecido. Ilustrando este principio, un sistema de administración energética digital podría lograr una merma en el gasto eléctrico de un recinto, ya sea al señalar despilfarros o al perfeccionar el funcionamiento de maquinarias. La comparación debe realizarse sobre una base equivalente de servicio y durante un período determinado.

La dicotomía entre la evasión y la generación de emisiones resulta fundamental para la suposición. Las eludidas implican aquellas que se soslayan merced a la implementación de una tecnología particular, por ende, en contrapartida, las generadas abarcan las inherentes a su producción, desplazamiento, activación, funcionamiento, mantenimiento y ciclo final. Consecuentemente, esto puede ser simulado conceptualmente mediante una formulación donde el beneficio climático neto equivale a las emisiones evadidas, restándole las emisiones inherentes. En caso de ser positivo dicho resultado, se observa una merma neta en la emisión; no obstante, si resulta negativo, el proyecto pudiera estar alterando o amplificando la presión sobre el entorno (Bhatia et al., 2024).

El examen científico, en rigor, debiese abarcar la totalidad del ciclo vital de la tecnología. Limitar la apreciación tan solo al lapso de su uso operativo puede, de forma harto

simplista, magnificar sus atributos ecológicos, singularmente si nos referimos a artilugios cuya gestación materializa o demanda volúmenes considerables de materia prima y de fuerza motriz. Un sistema inteligente puede consumir poca electricidad durante su utilización, pero requiere componentes electrónicos cuya producción demande minerales, agua y energía. Asimismo, los dispositivos pueden convertirse en residuos al finalizar su vida útil. Por esta razón, la evaluación debe incluir extracción de materias primas, fabricación, transporte, utilización, mantenimiento, reutilización y disposición final.

La adicionalidad ambiental es otro criterio de suma importancia. Se podría estimar como un alivio suplementario aquella atenuación del efecto adverso en caso de que su procedencia genuina sea una acción de orden tecnológico, y de no ser por esta, no se habría producido. Esta pauta permite la diferenciación de los avances que son el resultado directo de un desenvolvimiento innovador frente a las mermas que habrían ocurrido a causa de corrientes tecnológicas, marcos regulatorios o cambios en el entorno comercial. Con relación a la esfera metodológica, establecer una coyuntura inicial o una situación previa es imprescindible para la cuantificación del beneficio adicional derivado de la aplicación tecnológica.

La adicionalidad, además, demanda evaluar qué habría sucedido sin la aplicación de la solución digital. Si una compañía ya planeaba el reemplazo de su maquinaria por versiones más productivas, adjudicar la totalidad de la disminución del impacto ambiental a una flamante plataforma digital podría inducir a una exageración de sus ventajas. La elaboración de escenarios de referencia posibilita deslindar la influencia de la tecnología de otros elementos que operan al mismo tiempo en el rendimiento ambiental. Esto resulta especialmente importante para evaluar inversiones ambientales y evitar declaraciones de sostenibilidad que no estén respaldadas por evidencia cuantificable.

Otro criterio corresponde a la eficiencia ambiental por unidad de servicio. Una tecnología puede disminuir el impacto necesario para proporcionar una unidad de servicio, pero aumentar el impacto total si genera una expansión considerable de la demanda. Este fenómeno se encuentra relacionado con los efectos rebote. Por ejemplo, una infraestructura digital más eficiente puede reducir el consumo energético por unidad de procesamiento, pero el crecimiento del uso de servicios digitales puede elevar el consumo energético agregado. La neutralidad ambiental requiere, por tanto, analizar tanto la eficiencia relativa como la evolución del impacto absoluto.

De acuerdo con Bhatia et al. (2024), el principio también tiene que sopesar las repercusiones materiales inherentes a la digitalización. Los artefactos electrónicos, los servidores, las baterías y los equipos de telecomunicaciones, en suma, requieren de minerales y otras materias primas cuya proveniencia ecológica y social pudiera devenir problemática. No es intrínsecamente sostenible una innovación que persiga la minimización de las emisiones operativas si su adopción impone una ampliación considerable de la extracción de recursos vírgenes. Medidas tales como el aprovechamiento de insumos reciclados, la reintegración de componentes, la factibilidad de reparación y la prórroga de la utilidad operativa contribuyen a optimizar el perfil ecológico de dichas propuestas.

La durabilidad y reparabilidad deben incorporarse como condiciones para evaluar tecnologías digitales ambientalmente favorables. Un reemplazo asiduo de aparatos se correlaciona con una expansión en la huella material, lo que resulta en un incremento notable de desechos electrónicos. Cierta artefacto que presenta una longevidad extendida puede demandar un desembolso monetario preliminar equiparable, o quizás mayor, empero diluye sus repercusiones de manufactura a lo largo de un lapso más extenso. La facultad de mejorar partes y recomponer enseres, asimismo, posibilita preservar el valor pecuniario de las materias primas y mitiga la apremiante demanda de la obtención de nuevos recursos

La evaluación debe incluir igualmente los efectos indirectos y sistémicos. Una tecnología puede modificar precios, comportamientos, patrones de consumo y estructuras productivas. Una plataforma digital que optimiza la logística puede reducir kilómetros recorridos por unidad transportada, pero también puede facilitar un aumento considerable del comercio y del volumen total de entregas. De esta manera, el beneficio obtenido por eficiencia puede ser parcialmente compensado por el crecimiento de la actividad. La neutralidad ambiental demanda tomar en cuenta dichos efectos para poder determinar si realmente hay una disminución de la presión ambiental.

La fiabilidad de la información es un requerimiento esencial al momento de implementar este principio. Por eso, las estimaciones de emisiones eludidas, del gasto de energía, de los materiales consumidos y de los desechos generados es menester que se fundamenten en datos verificables y procesos metódicos estandarizados. Si cambian los marcos de referencia, las épocas de medición o los factores de emisión, es muy posible que los

resultados experimenten variaciones notables. Por ello, las evaluaciones deberían establecer criterios transparentes para seleccionar datos, definir escenarios de referencia y calcular impactos. La trazabilidad de la información permite mejorar la credibilidad de las declaraciones ambientales relacionadas con tecnologías digitales.

Desde una perspectiva económica, la neutralidad ambiental digital puede incorporarse a la evaluación de inversiones tecnológicas. Antes de implementar una solución, una organización puede comparar sus costos económicos con las emisiones, energía, agua y materiales requeridos y con los impactos que potencialmente permitirá evitar. Esto facilita determinar si una inversión genera simultáneamente eficiencia económica y beneficios ambientales. La evaluación puede incorporar periodos de recuperación, costos de operación, ahorro energético, reducción de residuos y disminución de riesgos climáticos (Ríos et al., 2025).

Las condiciones para declarar una tecnología ambientalmente favorable pueden incluir, por tanto, varios criterios simultáneos: reducción neta de impactos, adicionalidad verificable, evaluación del ciclo de vida, eficiencia en el uso de recursos, ausencia de efectos rebote significativos, durabilidad, reparabilidad y adecuada gestión de residuos. Esto permite evitar una valoración basada exclusivamente en la reducción de emisiones durante la etapa de operación. Una tecnología debería considerarse favorable cuando el conjunto de sus impactos demuestra una mejora ambiental respecto de una alternativa de referencia claramente definida.

La puesta en práctica del principio de neutralidad ambiental digital instaaura una conexión más precisa entre la metamorfosis tecnológica y la pervivencia ecológica. Ya no se pondera la digitalización en función de su potencial técnico, sino que se escruta a través de sus consecuencias ambientales absolutas. Dicho encuadre posibilita discernir si la inteligencia artificial, el internet de las cosas, la automatización o las arquitecturas digitales aportan de verdad a la mengua de presiones ecológicas y el momento en que estas podrían originar renovadas afectaciones que contrapesen sus bondades. El criterio fundamental pasa de preguntar si una tecnología es digital o eficiente a determinar, mediante evidencia, si produce una reducción ambiental adicional, medible y sostenible a lo largo de su ciclo de vida.

Figura 3.4. Pilares Estratégicos para Alcanzar la Neutralidad Ambiental Digital



Elaboración: Autores



EDITORIAL ANDES COGNITIO

CAPÍTULO VI

INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA EVALUACIÓN AMBIENTAL INTEGRADA



CAPÍTULO IV

INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA EVALUACIÓN AMBIENTAL INTEGRADA

4.1. Inteligencia artificial y toma de decisiones ambientales

La inteligencia artificial (IA) adquiere una relevancia monumental en la valoración y la gobernanza de los sistemas ambientales. Su destreza radica en su habilidad para manejar cantidades masivas de datos, develando conexiones intrincadas que eludirán las aproximaciones tradicionales. Respecto al entorno natural, su implementación transita de evaluaciones meramente reactivas a estrategias proactivas de reconocimiento de patrones, presagio de peligros y soporte a la toma de determinaciones. Dicha competencia cobra una importancia sobresaliente cuando se amalgaman factores climáticos, económicos, energéticos y de uso de recursos en un marco analítico cohesionado.

La IA descriptiva constituye uno de los niveles iniciales de aplicación y se orienta principalmente a comprender qué está ocurriendo dentro de un sistema ambiental. Mediante metodologías de procesamiento y análisis de datos, es viable detectar tendencias sobre emisiones, el consumo energético, generación de residuos, la utilización del agua o aquel comportamiento de ciertos indicadores ambientales. Su contribución clave, en efecto, se asienta en la conversión de cantidades enormes de información en patrones inteligibles para aquellos ejecutivos encargados de la gestión. En consecuencia, una empresa podía reconocer esos procesos que acumulan niveles más altos de impacto ambiental y, en base a eso, establecer prioridades para la intervención.

La inteligencia artificial descriptiva apalanca datos de sensores, registros empresariales, observatorios climáticos, satélites e infraestructuras de supervisión digital. Integrar estas fuentes resulta crucial para edificar una visión ampliada sobre el comportamiento ecológico de una operación. A modo ilustrativo, información relativa al consumo energético se puede unificar con detalles de producción y liberaciones para calibrar el peso ecológico de ciertos procedimientos. La incorporación de técnicas de inteligencia artificial facilita además la clasificación de información y la identificación automática de comportamientos anómalos (Yassen et al., 2025).

La IA predictiva, como avance respecto al análisis descriptivo, intenta proyectar comportamientos futuros. Esto lo logra utilizando información previa y datos disponibles en tiempo real. En cuanto al ámbito ecológico, su uso es viable para anticipar la generación de residuos, el consumo eléctrico, las emisiones, la disponibilidad hídrica o la posibilidad de que ocurran determinados acontecimientos. Los modelos predictivos con la habilidad de entender complicadas conexiones entre factores económicos, climáticos, de producción y ambientales muestran un potencial de cambio profundo. Mediante este método, las decisiones estratégicas avanzan más allá de solo mirar el pasado al incluir vitalmente pronósticos de posibles futuros escenarios.

En esos campos de actuación donde las repercusiones de una reacción tardía resultan en costos excesivos, la previsión ambiental gana importancia fundamental. Pensemos, por caso, en una empresa adoptando técnicas predictivas para prever un aumento en el uso de energía, lo que ayuda a un ajuste anticipado y, consecuentemente, mejora sus actividades inmediatas. De manera similar, un sistema municipal puede estimar la generación futura de residuos y adaptar la planificación de recolección y tratamiento. En agricultura, los modelos pueden combinar información meteorológica, condiciones del suelo y datos históricos para anticipar determinadas necesidades de recursos. La capacidad predictiva transforma los datos ambientales en una herramienta de prevención.

Un tercer nivel corresponde a la IA prescriptiva, cuyo objetivo no se limita a determinar qué está ocurriendo o qué podría suceder, sino que busca identificar qué acciones podrían generar mejores resultados. Estos sistemas pueden comparar diferentes alternativas y recomendar decisiones considerando restricciones económicas, ambientales y operativas. Por ejemplo, un algoritmo podría evaluar distintas estrategias de producción y seleccionar aquella que minimice simultáneamente costos, consumo energético y generación de emisiones. La IA prescriptiva permite, por tanto, acercar el análisis ambiental a los procesos concretos de toma de decisiones.

Plataformas destinadas a suministrar datos valiosos para administradores, compañías y el poder público anidan dichas facultades en sus entrañas: los sistemas inteligentes para auxilio en la toma de decisiones. Capaces son estas herramientas de amalgamar archivos informáticos, métodos estadísticos, rutinas de aprendizaje automático, índices ambientales y programas de modelaje; los sistemas de apoyo integran estas capacidades. Su propósito no reside invariablemente en sustituir a quien tiene la carga de decidir, sino

en magnificar su alcance para diseccionar contextos intrincados; los sistemas inteligentes de apoyo a decisiones integran estas capacidades. Las determinaciones definitivas podrían tener en cuenta no solo lo sugerido por la máquina, sino también los factores de orden dinerario, normativo, colectivo y de dirección.

La automatización puede extenderse hacia determinadas decisiones ambientales operativas. Un sistema inteligente puede ajustar automáticamente determinados parámetros de consumo energético, regular sistemas de climatización, modificar procesos industriales o activar mecanismos de alerta cuando se superan determinados umbrales. La automatización resulta especialmente útil cuando las variables ambientales cambian rápidamente y requieren respuestas inmediatas. Sin embargo, la delegación de decisiones debe acompañarse de mecanismos de supervisión para evitar errores derivados de datos incompletos, modelos inadecuados o condiciones no contempladas durante el entrenamiento (Yassen et al., 2025).

En el terreno económico, la IA posee el potencial de impulsar un avance muy notable en la distribución de bienes ambientales. Sus aptitudes para escrutar grandes volúmenes de datos son fundamentales para identificar las oportunidades de inversión que pueden producir resultados más favorables en cuanto a reducir las emisiones, disminuir los desechos y aprovechar mejor los recursos. Además, su intervención puede ser vital para refinar las etapas productivas, resultando en menores costos asociados al desperdicio. Entonces, el desempeño ambiental se integra con las variables de producción y competitividad, dejando de lado la visión de que cuidar el medio ambiente representa únicamente un gasto para el negocio.

No obstante, la inteligencia artificial que utilizamos para tomar decisiones sobre asuntos ambientales requiere datos confiables, actualizados y capaces de reflejar verdaderamente la situación analizada. Si bien un algoritmo podría elaborar previsiones de gran sofisticación técnica, su eficacia se encontrará condicionada por la calidad de los datos con los que se alimenta. La ausencia de información completa podría traer como consecuencia errores en todo el sistema, mientras que los datos incompletos pueden desembocar en propuestas que no capten plenamente las condiciones propias del lugar o del área que se esté analizando. Consecuentemente, la estructura primordial para la gestión de la información cobra una importancia equivalente a la del propio algoritmo en el corazón de los sistemas inteligentes de evaluación ambiental.

También es necesario considerar la interacción entre IA, circularidad y cambio climático. Un sistema inteligente puede predecir cuándo un equipo requiere mantenimiento, prolongando su vida útil y reduciendo la necesidad de nuevos materiales. Puede igualmente optimizar rutas de transporte, disminuir consumos energéticos o identificar oportunidades para recuperar residuos. Sin embargo, la propia infraestructura necesaria para ejecutar estos sistemas genera consumo energético y material. La evaluación debe considerar, por tanto, el balance entre los impactos generados por la tecnología y los beneficios ambientales derivados de su aplicación.

De acuerdo con Tiwari et al. (2025), la integración de inteligencia artificial en la toma de decisiones concernientes al medio ambiente demanda, en última instancia, la delineación de pautas de responsabilidad, vigilancia y gobierno. Tales resoluciones ambientales pueden originar consecuencias económicas y sociales de gran calaña, en especial cuando afectan acueductos, infraestructuras, la geografía o los patrones de producción. En tal situación, la automatización necesita ser auxiliada con sistemas de confirmación humana, transparencia en los fundamentos que sustentan las decisiones y un seguimiento constante de la efectividad de los modelos algorítmicos. La inteligencia artificial será capaz de prosperar hasta alcanzar la posición de una herramienta avanzada para la gestión ambiental una vez que sus capacidades de pronóstico y de establecimiento de normas se integren con datos confiables, análisis económicos y principios de responsabilidad ecológica.

4.2. Big Data ambiental

La data masiva ambiental engloba la vasta recolección de información generada sin cesar por fenómenos naturales, faenas económicas, implementos tecnológicos y operaciones fabriles. Su relevancia no solo yace en la magnitud de los datos, sino también en su ritmo de producción, multiplicidad y potencial para su manejo por métodos analíticos sofisticados. Dentro del ámbito de la valoración ambiental unificada, la data masiva posibilita vincular factores que antes se investigaban en soledad, tales como emisiones, requerimiento energético, clima, desechos, agua y dinamismo económico.

Las fuentes de datos ambientales, las cuales exhiben una notable diversificación hoy día, son fruto directo del auge incontenible de las tecnologías digitales. De entre la pléyade de opciones que se nos presentan, se encuentran las estaciones meteorológicas, sensores de

diversa índole para el escrutinio ambiental, las insustituibles imágenes satelitales, los potentes sistemas de información geográfica, así como los valiosos registros empresariales, las bases de datos emanadas de los organismos gubernamentales y las multifacéticas plataformas digitales. Incluso, con una pertinencia creciente, datos provenientes de la movilidad vehicular, la omnipresencia de dispositivos inteligentes y los sistemas industriales que operan bajo automatización encuentran cabida en este vasto universo informativo. La sinergia resultante de la amalgama de tales fuentes de información propicia la edificación de corpus de datos que ostentan una cobertura, tanto espacial como temporal, superlativamente ampliada en comparación con aquella que antaño se lograba a través de las vetustas metodologías de recopilación.

Los sensores de IoT son una fuente de información ambiental especialmente vital. Estos aparatos pueden medir aspectos como la temperatura, la humedad, el estado del aire, cuánta agua y electricidad se consume, la presión atmosférica, las emanaciones de gases y cómo van ciertas operaciones industriales. Porque están conectados a redes de internet, ellos dejan que los datos viajen muy rápido. Como resultado, es posible detectar cambios en el ambiente y en la producción, sin necesidad de revisiones poco frecuentes. La información generada puede posteriormente alimentar modelos predictivos destinados a identificar riesgos o mejorar la eficiencia de los recursos (Carvajal et al., 2026).

El empleo de satélites y sistemas de observación terrestre expande sustancialmente la potestad de monitoreo ambiental. Imágenes satelitales son capaces de ofrecer noticias acerca de mutaciones en cubrimiento vegetal, deforestación, crecimiento urbano, acceso hídrico, temperatura superficial y ciertas afecciones de contaminación. Uno de sus beneficios muy significativos se concentra en hacer posible el examen detallado de amplias zonas geográficas, hecho que se realiza cada cierto tiempo. Cuando se une esta información con variables económicas y climáticas, es factible estudiar los vínculos entre los cambios territoriales, la vida productiva y las exigencias sobre el entorno natural.

Los reportes empresariales son un camino más bien útil para crear bases de datos masivas en el ámbito ambiental. Las empresas generan datos referentes a sus rangos de producción, la sed de energía, el uso de materiales, cómo administran el agua, cuánto desecho generan, sus modos de transporte y la protección de lo que usan para operar. Tradicionalmente, muchos de estos datos se utilizaban principalmente para fines contables y operativos. Sin embargo, su integración con información ambiental permite

estimar indicadores de eficiencia y detectar relaciones entre desempeño económico y presión ambiental. La digitalización de los procesos empresariales facilita que estos registros puedan utilizarse posteriormente en modelos de inteligencia artificial.

Los datos climáticos posibilitan la integración de la perspectiva temporal y espacial del cambio climático durante la evaluación ambiental. Condiciones atmosféricas tales como la temperatura, la lluvia, la velocidad del viento, la humedad y la ocurrencia de fenómenos climáticos extremos, las relacionamos con el rendimiento y factores ambientales. A causa de esto, es posible descubrir de qué forma ciertas condiciones climáticas pueden impactar en la demanda energética, la producción, la disponibilidad de agua o la generación de desechos. Igualmente, la mezcla de historiales y observaciones presentes impulsa el desarrollo de simulaciones para medir riesgos futuros y respaldar planes de adaptación.

Conforme a Mayer y Cukier (2013), la demanda de energía es un elemento crucial entre los volúmenes masivos de información ambiental. Las plataformas digitales son capaces de registrar el consumo eléctrico de edificios, fábricas, centros de datos, flotas de transporte y otros activos casi al instante. Estos datos permiten identificar tendencias de consumo, señalar épocas de alta demanda y detectar probables ineficiencias. Al combinar los datos energéticos con información de producción, temperatura o estados operativos, creamos modelos que explican las causas del uso de energía y proponen formas de optimizarlo.

La dificultad metodológica principal radica en unir fuentes dispares. Los datos medioambientales vienen en muchas formas distintas, cada una con sus periodos de recolección, su diferente manera de ser presentados y su propio nivel de precisión. Una estación que guarda información en lapsos cortos de tiempo tal vez fuera radicalmente distinta de un informe económico que se presenta de forma regular. Su uso combinado demandará la instauración de fases de depuración, reestructuración, uniformidad y ajuste temporal. La solvencia de la integración impacta directamente en la veracidad de los hallazgos de inteligencia artificial.

Los megadatos ambientales posibilitan superar las restricciones de análisis apoyados en muestras limitadas o periodos descontextualizados. Una abundancia de datos grandemente facilita descubrir tendencias, estacionalidades y vínculos no lineales entre las variables. La inteligencia artificial avanzada es capaz de tratar estas colecciones de datos para hallar patrones que no serían obvios con métodos estadísticos tradicionales.

Pero un mayor volumen de información no asegura inherentemente resultados superiores, por cuanto la pertinencia, integridad y característica representativa de la data continúan siendo pilares esenciales.

Desde una óptica económica, la aplicación de big data ambiental puede optimizar la distribución de recursos y la eficiencia productiva. Las corporaciones pueden ahora mismo reconocer qué procesos son ineficientes, prever lo que hace falta para la conservación y sacar el mejor partido de los recursos materiales y la energía. Los gobiernos, en una posición bien ventajosa, pueden emplear los datos geográficos, señalar qué ideas son buenas para el ambiente y crear normativas que se amolden a las realidades de cada lugar. Tener datos que son más uniformes hace menos dudosas las cosas y permite que mejoren mucho las elecciones a la hora de invertir y planificar.

La integración de Big Data con inteligencia artificial permite transformar grandes cantidades de información en modelos de diagnóstico, predicción y recomendación. Los datos históricos pueden utilizarse para entrenar modelos que estimen emisiones futuras, generación de residuos o consumo energético. Los datos en tiempo real pueden posteriormente actualizar las predicciones y detectar desviaciones respecto a los valores esperados. De esta forma, el sistema puede pasar de una evaluación estática hacia una gestión ambiental continua y adaptativa (Carvajal et al., 2026).

Sin embargo, la utilización exhaustiva de datos trae aparejados intrínsecamente peligros vinculados a la confidencialidad, la salvaguarda técnica, la compatibilidad mutua y la supervisión. Expedientes medioambientales y corporativos es factible que alojen detalles delicados sobre métodos de fabricación, redes esenciales o tendencias de compra. Adicionalmente, entidades diversas tal vez empleen esquemas no afines, complicando así la transmisión fluida de datos. De suma importancia es la implementación de normativas de protección, estándares de interoperabilidad y directrices inequívocas relativas a la obtención y el empleo de los registros. La administración de la información emerge de este modo como un prerequisite indispensable para capitalizar la magnitud del big data en el ámbito ambiental.

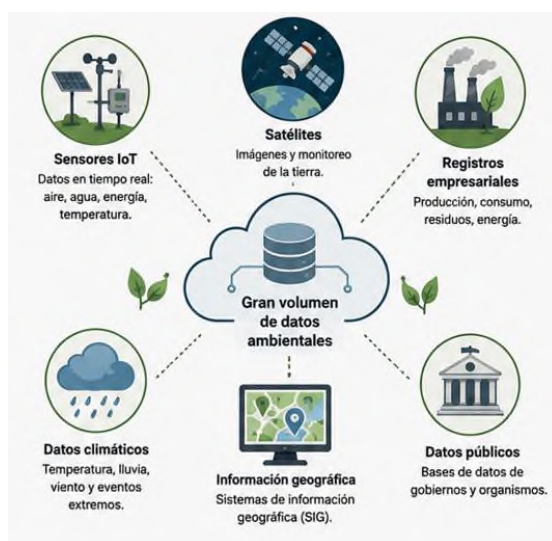
La construcción de sistemas de Big Data ambiental también requiere infraestructura tecnológica y capacidades humanas especializadas. El almacenamiento, procesamiento y análisis de grandes volúmenes de información demanda servidores, redes, software y

CAPÍTULO 4. INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA EVALUACIÓN AMBIENTAL INTEGRADA

profesionales capaces de interpretar los resultados. Las organizaciones necesitan combinar conocimientos ambientales con competencias en estadística, programación, inteligencia artificial y gestión de datos. Esta combinación interdisciplinaria permite evitar que la tecnología sea utilizada de manera aislada respecto de los objetivos ambientales y económicos.

Los macrodatos medioambientales tendrán el potencial de convertirse, en última instancia, en un almacén básico para un análisis medioambiental integrado y con capacidad de predicción. La convergencia de dispositivos IoT, plataformas satelitales, documentación corporativa, datos meteorológicos y patrones de consumo de energía posibilita el desarrollo de arquitecturas capaces de monitorizar de forma paralela las variadas facetas del desempeño ecológico. Al fusionarse esta data con la aplicación de la inteligencia artificial, es factible identificar falencias, prever contingencias y calibrar distintas estrategias de actuación. El discernimiento sustancial de los macrodatos no se limita al acopio indiscriminado de datos, sino a su transformación en entendimiento aplicable con el fin de optimizar la utilización de recursos, mitigar las repercusiones ecológicas y direccionar ópticas financieras frente a escenarios de variabilidad.

Figura 4.1. Fuentes de Origen para el Almacenamiento e Integración de Grandes Volúmenes de Datos Ambientales



Elaboración: Autores

4.3. Modelos predictivos de desempeño ambiental

Modelos predictivos de rendimiento ambiental representan instrumentos diseñados para cuantificar el curso futuro de parámetros vinculados a emisiones, al uso de recursos, a la producción de desechos, a la optimización energética y además índices ecológicos. Utilizarlos posibilita transitar de una valoración sola basada en datos históricos hacia una administración que puede de antemano prever contratiempos. Dentro de dicho marco, la inteligencia artificial, al lado de técnicas de estadística, brinda vías para entender nexos entre aspectos de entorno, economías, tiempo y asuntos de tecnología. Lo productivo de semejantes modelos igualmente yace en su talento para adivinar y en la corrección y suficiencia de los datos que los sustentan.

La regresión representa una de las herramientas metodológicas predilectas para escudriñar los vínculos existentes entre un factor resultante y una serie de factores predictivos. En el dominio ecológico, su aplicación posibilitaría la cuantificación de emisiones a partir de la escala productiva, del gasto de energía, del arsenal tecnológico o de los patrones atmosféricos. De igual forma, los constructos de regresión brindan el beneficio de simplificar la elucidación de los nexos dilucidados. Ilustrativamente, podrían hacer patente en qué medida fluctuaría el requerimiento energético frente a una elevación concreta en el volumen de bienes, si otros elementos permanecieran invariables (Serra et al., 2026).

Una ventaja de los modelos de regresión es su utilidad para vincular desempeño ambiental y variables económicas. El consumo energético puede relacionarse con producción y empleo, mientras que las emisiones pueden analizarse en función de actividad económica, estructura productiva y fuentes de energía. Esta relación entrena para construir índices de intensidad ambiental y verificar si el progreso económico ocurre con aumento o disminución en la tensión sobre los recursos. De todos modos, ante interdependencias muy no lineales o fructuosas interacciones entre factores, sería menester algoritmos de aprendizaje automático de un amplio alcance.

Los árboles de decisión son esquemas que dividen los datos por medio de pautas subsiguientes para clasificar observaciones o dar pronósticos. En el campo ambiental, se podrían usar para desenredar condiciones asociadas a niveles altos o bajos de emisiones, desechos o consumo energético. Su arquitectura facilita la evaluación de los factores que

afectan las conclusiones del esquema. A modo de ejemplo, un árbol podría deducir que ciertos niveles de producción, temperatura y demanda energética están asociados a una notable intensidad ambiental.

Los árboles de decisión adicionalmente sirven para definir tipos de riesgos ecológicos. Un sistema podría explicar si una instalación manifiesta un riesgo escaso, moderado o considerable al considerar factores como ubicación, vulnerabilidad climática, antigüedad de la infraestructura, gasto de energía y circunstancias operativas. Dicha aptitud trae consigo un gran provecho para dar preferencia a exámenes conservadores o desembolsos de ajuste. Asimismo, al proveer pautas que tienen una lógica para ser interpretadas, estos métodos pueden acelerar la comunicación de resultados a quienes toman decisiones sin tener que saber mucho sobre aprendizaje automatizado.

Random Forest: Este método hace más amplio lo que un árbol de decisión puede hacer, construyendo un grupo de ellos y luego juntando lo que cada uno predice. Este enfoque, una vez comparado con solo un árbol, puede mejorar bastante la solidez y cuánto puede predecir ante las relaciones complicadas entre variables. En casos ambientales, se aplica para predecir desechos, el consumo de energía, la calidad del aire o la posibilidad de sucesos específicos. Su habilidad para manejar muchas variables es clave al usar datos de finanzas, clima, tecnología y ecología.

El gradient boosting sigue una manera diferente, construyendo modelos uno tras otro, intentando corregir los errores que los modelos antes que ellos cometieron. Esta característica le da mucha fuerza para predecir en datos que son difíciles de entender. En el ámbito ambiental, su empleo otorga la potestad de prever múltiples variables variadas. Por ejemplo, emisiones gaseosas, consumo de insumos y la cuantía de degradación. Este activo de información despliega un valor que se eleva sobremanera, en especial en situaciones donde las conexiones entre los determinantes y las repercusiones del entorno exhiben patrones que no son lineales o interdependencias complejas. Modelos convencionales muchas veces lo captan de forma incompleta.

Según Aldrees et al. (2023), las redes neuronales artificiales se presentan como esquemas con la aptitud de captar conexiones complejas a partir de grandes cantidades de información. Son instrumentos provechosos para reconocer tendencias no lineales y procesar información procedente de sensores variados, capturas visuales, registros cronológicos o diversas fuentes de forma simultánea. Dentro del ámbito de uso ambiental,

estas redes sirven para anticipar la contaminación, calcular el consumo energético, proyectar la demanda de agua, dimensionar las emisiones o vaticinar las condiciones climáticas. Sin embargo, la intrínseca complejidad de estos planteamientos puede entorpecer una captación clara de sus consecuencias, sobre todo si el constructo opera mediante una estructura de alta dimensión en la que los enlaces se ven difícilmente.

La elección del marco de predicción ha de considerar los matices del caso, los datos disponibles y el objetivo del cálculo. Quizás un marco de regresión resulte más apropiado si se requiere comprender la relación entre los factores; mientras tanto, Random Forest o Gradient Boosting son convenientes si el objetivo prioritario es conseguir una alta precisión en las predicciones. Las redes neuronales presentan una ventaja especial con volúmenes de datos abrumadores y un entrelazamiento sofisticado. No existe, por ende, una pauta infaliblemente superior; la elección debe basarse en comparaciones reales y validación.

La validación de marcos es una etapa primordial para garantizar la fiabilidad de los pronósticos. Un marco podría mostrar cifras fantásticas con la información utilizada en su fase de aprendizaje, pero aun así, demostrar un desempeño deficiente frente a datos que no ha encontrado previamente. Para evitar este problema, se utilizan conjuntos de entrenamiento y prueba, validación cruzada y diferentes métricas de error. En aplicaciones ambientales también es importante evaluar el modelo en períodos o territorios diferentes a aquellos utilizados durante su construcción, especialmente cuando se pretende utilizarlo para predicciones futuras.

Los modelos predictivos pueden enriquecerse mediante variables económicas, climáticas y tecnológicas. La producción industrial, los precios de la energía, la temperatura, la precipitación, la infraestructura, la digitalización y la naturaleza misma de los procesos, todo ello explica el desempeño ambiental. Esta combinación única permite elaborar modelos que no solo ven las variables ambientales en aislamiento, sino como resultado de la compleja danza entre la economía, la tecnología y los elementos naturales. De esta manera, la predicción se convierte en una herramienta sumamente útil para evaluar las distintas opciones de transición.

Los modelos econométricos ambientales híbridos combinan herramientas estadísticas y técnicas de aprendizaje automático. La econometría ofrece análisis de las relaciones

económicas, la causalidad, las elasticidades y las implicaciones de las políticas, mientras que el aprendizaje automático amplifica las predicciones mediante el análisis de vínculos complejos. Dicha combinación resulta muy relevante para estimar escenarios en los que una determinada decisión económica o tecnológica modifica, al mismo tiempo, la producción, el consumo de energía y las emisiones. El objetivo es aprovechar las fortalezas de ambos enfoques sin reducir el análisis ambiental exclusivamente a la predicción algorítmica (Serra et al., 2026).

Una aplicación importante de estos modelos corresponde a la predicción de escenarios de desempeño ambiental. Una empresa puede simular qué ocurriría con sus emisiones si aumenta la utilización de energías renovables, modifica su tecnología productiva o implementa sistemas de mantenimiento predictivo. Del mismo modo, un municipio puede estimar la generación futura de residuos bajo diferentes tasas de crecimiento poblacional y políticas de reciclaje. Estas simulaciones permiten comparar alternativas antes de realizar inversiones y facilitan una gestión orientada a la anticipación.

La utilización de modelos predictivos también permite identificar puntos críticos y oportunidades de intervención. Si un modelo determina que determinadas variables explican una proporción importante del consumo energético o de las emisiones, la organización puede concentrar sus recursos en modificar esos factores. Esta información puede complementar análisis de costos y beneficios para determinar qué medidas presentan mayor potencial de mejora. La predicción deja así de ser exclusivamente una herramienta estadística y se convierte en un mecanismo de apoyo para la planificación ambiental y económica.

Los modelos predictivos de desempeño ambiental permiten avanzar finalmente hacia una gestión basada en anticipación, en la que los datos históricos, información en tiempo real y técnicas de inteligencia artificial se utilizan para estimar consecuencias futuras. Su aplicación tiene la posibilidad de mitigar subidas de emisiones, reducir merma, tornar más efectivo el uso de recursos y prever acontecimientos climáticos. No obstante, los descubrimientos que emanan de estas herramientas demandan una interpretación contextualizada debido a la inseguridad intrínseca, la calidad de los datos usados y las limitaciones de las técnicas implementadas. Si estos modelos se integran apropiadamente con lineamientos económicos y ecológicos, proveen una base numérica apreciable para

mejorar la toma de decisiones y dirigir los procesos de producción hacia senderos de productividad magnificada y un reducido impacto ecológico.

4.4. Econometría ambiental y aprendizaje automático

La econometría ambiental hace posible examinar numéricamente los vínculos entre la actividad económica y la demanda sobre el entorno natural. Se elaboran modelos donde factores como emisiones, gasto energético, utilización de recursos o deterioro ambiental se correlacionan con expansión económica, inversiones, intercambios comerciales, avances tecnológicos y el entramado productivo. Con este abordaje se logra cuantificar la magnitud y la orientación de los nexos identificados y así verificar si alteraciones económicas específicas guardan relación con aumentos o disminuciones de la presión ecológica. La integración de metodologías de aprendizaje automatizado expande estas capacidades al posibilitar el manejo de asociaciones más intrincadas y cantidades masivas de datos.

Un nexo investigado de manera persistente en la literatura académica se relaciona con la interconexión entre la expansión económica y las repercusiones ecológicas. Durante las fases iniciales del progreso manufacturero, el incremento en la producción puede ir aparejado con un uso más intensivo de energía, materiales brutos y dotaciones naturales. Conforme avanza el tiempo, la adopción de tecnologías optimizadas, ajustes sectoriales y normativas ecológicas son capaces de alterar dicha correspondencia. El escrutinio econométrico posibilita dilucidar si estas mutaciones se reflejan de forma tangible en los datos y en qué coyunturas económicas emergen modificaciones en la senda ambiental.

De acuerdo con (Pérez et al., 2021), la Curva Ambiental de Kuznets (CAK) representa una perspectiva capital para el análisis de tal nexo. Su planteamiento central sugiere que ciertas métricas de detrimento ecológico podrían incrementarse en las fases iniciales de progreso económico y subsecuentemente declinar tras alcanzar un umbral de rédito establecido. Tradicionalmente, esta relación se grafica con una figura de U invertida entre el rédito y el detrimento ambiental. No obstante, la confirmación de tal vínculo es contingente al indicador ambiental específico, la nación en cuestión, el marco temporal y la conformación económica escudriñada; por ende, no se le debe conceder el estatus de ley universal inquebrantable.

Modelos ligados a la curva medioambiental de Kuznets permiten incorporar predictores secundarios, ayudando a clarificar el rumbo de los volúmenes de basura o presiones ecológicas suplementarias. Entre las variables disponibles podemos encontrar la demanda de energía, la estructura industrial, la urbanización, el comercio internacional, la inversión extranjera, el ingenio tecnológico y la adopción de energías verdes. Este ensanchamiento promueve evitar una concepción basándose nada más que en el flujo monetario. La presión sobre el medio ambiente surge de innumerables elementos, tanto económicos como técnicos, y la intrincada red de sus vínculos exige marcos capaces de capturar ese amplio espectro de influencias.

Los modelos ARDL (Autoregressive Distributed Lag) hacen fácil develar las interconexiones entre las variables, mostrando su utilidad al abordar variables con distintos niveles de integración, si es que nos mantenemos dentro de los límites dictados por las reglas metodológicas. En economía ambiental pueden utilizarse para analizar relaciones de corto y largo plazo entre crecimiento económico, consumo energético, emisiones y otras variables explicativas. Una de sus ventajas consiste en distinguir los efectos inmediatos de aquellos que se manifiestan progresivamente. Esto resulta relevante porque una inversión tecnológica puede generar costos ambientales iniciales y beneficios que aparecen posteriormente.

Modelos de autorregresión vectorial (VAR) posibilitan la consideración de múltiples variables endógenas que progresan conjuntamente en el transcurso del tiempo. En el ámbito de las investigaciones ambientales, estos pueden ser aplicados para dilucidar las interrelaciones existentes entre la expansión económica, la ingesta de energía, las liberaciones contaminantes, las inversiones realizadas y el avance tecnológico. Es factible que cada una de las variables se halle supeditada a sus propias determinaciones pretéritas, al igual que a los estadios previos de las otras variables contenidas dentro del sistema. Dicha metodología faculta la exploración de cómo una alteración en una variable dada puede irradiarse a otras esferas del complejo sistema económico-ambiental.

Cuando las variables del sistema presentan relaciones de equilibrio de largo plazo, pueden utilizarse modelos VEC (Vector Error Correction). Estos modelos permiten analizar simultáneamente las dinámicas de corto plazo y la relación de largo plazo entre variables. En materia ambiental, pueden contribuir a estudiar si determinadas variables económicas y ambientales mantienen una relación estructural a través del tiempo. Por ejemplo, su

aplicabilidad se nota al examinar la adaptación del consumo de energía, el avance económico y las emisiones subsiguientes a una perturbación. Este método consigue una visión cambiante, trascendiendo las evaluaciones que se limitan a correspondencias sincrónicas.

Los esquemas de datos de panel permiten la agregación de datos de diversas naciones, áreas geográficas, compañías o industrias a lo largo de distintos lapsos. Tal organización aumenta la cantidad de observaciones factibles, así como la examinación de disimilitudes entre las entidades económicas y las evoluciones temporales. En economía ambiental, los paneles pueden utilizarse para estudiar determinantes de emisiones, eficiencia energética, consumo de recursos o adopción tecnológica. Además, permiten controlar determinadas características individuales de las unidades estudiadas y analizar si los efectos estimados presentan comportamientos similares o diferentes entre territorios.

El aprendizaje automático, o machine learning, trae consigo una lente de análisis que diverge significativamente de la perspectiva econométrica convencional. Tradicionalmente, la econometría pone un énfasis notorio en la interpretación de sus parámetros, junto con la evaluación minuciosa de hipótesis; no obstante, los algoritmos de aprendizaje automático priorizan la destreza predictiva. Procedimientos metodológicos, tales como Random Forest, Gradient Boosting y el uso de redes neuronales, se muestran aptos para discernir vínculos no lineales y complejidades interactivas entre una multiplicidad de variables. Esta facultad adquiere particular relevancia cuando la sustentabilidad ambiental se halla supeditada, al mismo tiempo, a determinaciones de índole económica, climática, tecnológica y productiva.

Una disparidad esencial entre las dos metodologías radica en la inferencia estadística, en contraste con la predicción algorítmica. La econometría pretende esclarecer la magnitud, significancia y dirección de las interconexiones entre variables, en tanto que el aprendizaje automático otorga primordial importancia a la exactitud para pronosticar observaciones subsecuentes. Es posible que un modelo de aprendizaje automático arroje pronósticos sobresalientes sin que esto implique una interpretación económica lineal de cada nexo. A la inversa, un modelo econométrico puede proporcionar desgloses más nítidos; sin embargo, no alcanza necesariamente la misma cota de exactitud predictiva en configuraciones intrincadamente complejas (Akyapı, 2023).

Esta diferencia no implica que la econometría y el aprendizaje automático sean metodologías excluyentes. La sinergia de estas metodologías presenta ventajas sustanciales para la evaluación ambiental. Los modelos econométricos ayudan a desentrañar relaciones subyacentes y a verificar hipótesis particulares; al mismo tiempo, las técnicas de aprendizaje automático pueden potenciar la conversación con proyecciones y el reconocimiento de patrones emergentes. Esta convergencia resultará muy beneficiosa si buscamos evaluar, de forma integral, la causalidad, las alternativas económicas y el devenir de los indicadores ecológicos.

La adopción del aprendizaje automático permite, por otro lado, el uso de vastas colecciones de datos ambientales y económicos procedentes de sensores, satélites, informes de empresas y sistemas digitales. Estos conjuntos de datos incluyen millares, e incluso millones, de entradas que sería muy laborioso procesar con enfoques tradicionales. Las inteligencias artificiales pueden identificar asociaciones intrínsecas entre variaciones de temperatura, demandas energéticas, rendimientos productivos, emisiones o la utilización de recursos. Sin embargo, el aumento de la capacidad computacional no anula la necesidad crítica de una elección criteriosa de las variables y de un conocimiento sólido del contexto económico y ecológico de los datos.

Un aspecto crucial reside en qué tan bien respaldadas y sólidas son las conclusiones obtenidas. Los modelos econométricos, no es secreto, necesitan ser sometidos a pruebas exhaustivas: especificación, autocorrelación, heterocedasticidad, estacionariedad, estabilidad y más. Esta evaluación, curiosamente, se entrelaza íntimamente con la propia estructura subyacente de los datos. Ahora, pasando a los modelos de aprendizaje automático, su naturaleza exige procedimientos de validación sumamente estrictos. De hecho, la evaluación fuera de muestra, junto con un control férreo del sobreajuste, resultan ser pilares insustituibles. El verdadero valor de los hallazgos en ambos campos, la cosa es, radica en la calidad intrínseca de la información que los alimenta. La metodología empleada, además, presenta una corrección que es en sí misma vital. Aunque las predicciones estadísticamente sólidas puedan parecer deseables, estas no siempre aseguran una interpretación ambiental verdaderamente adecuada, sobre todo si el modelo ignora variables esenciales o se basa en datos que no reflejan fielmente la realidad (Akyapı, 2023).

La conjunción de la econometría ambiental y el aprendizaje automático propicia el surgimiento de sistemas analíticos realmente potentes. Con ellos, estos sistemas adquirirán la habilidad de establecer vínculos entre el rendimiento económico, las repercusiones ambientales y la evolución tecnológica. Tales sistemas demostrarán ser invaluable para evaluar adecuadamente. Como trayectorias de crecimiento divergentes, fomentos a la innovación o patrones de consumo energético, tienen el potencial de modificar significativamente las emisiones y el aprovechamiento de recursos. La econometría, por su parte, aporta un entendimiento explicativo profundo, junto con un análisis detallado de las conexiones estructurales existentes. El aprendizaje automático, a su vez, amplifica enormemente el reconocimiento de patrones y también pronostica. Esta complementariedad permite desarrollar herramientas de análisis ambiental más dinámicas, capaces de apoyar decisiones económicas bajo escenarios de incertidumbre y transformación tecnológica.

Figura 4.2. Modelos Econométricos y Herramientas de Análisis para la Evaluación del Impacto Ambiental



Elaboración: Autores

4.5. Gemelo digital ambiental

El gemelo digital ambiental se define como una virtual y evolutiva emulación de un proceso organizativo, territorial, infraestructural o productivo que imita conductos de su físico contraparte usando datos contemporáneos. Su más distintivo atributo se encuentra en crear un vínculo sin interrupción entre la realidad física y su contraparte digital. Por

medio de tal interrelación, es factible entender los estadios presentes, explorar tendencias del pasado y predecir modificaciones futuras antes que pasen a ser realidad. En el ámbito ambiental, este progreso hace más fácil integrar aspectos relativos al gasto energético, la emisión de gases, materiales, flujo de agua, residuos y condiciones climáticas dentro de un marco interpretativo claro.

La edificación de un duplicado virtual exige una estructura de datos apta para reflejar la operación del sistema tangible. Los dispositivos de sensores IoT son capaces de suministrar datos relativos a la temperatura, el consumo de energía, la generación, el uso del agua o el desempeño de la maquinaria. Las plataformas de información corporativas pueden aportar datos financieros y operacionales. Por otro lado, los sistemas de monitorización global logran integrar parámetros espaciales y atmosféricos. La combinación de esas fuentes ayuda a una representación digital actual, formulando una historia más completa sobre el ambiente del sistema.

Las informaciones transitorias son uno de los pilares importantes del gemelo virtual. La recogida continua de datos permite comprender los cambios en las condiciones de funcionamiento y la actualización de las imágenes conceptuales del sistema. Por ejemplo, una fábrica podría registrar continuamente el uso de energía, la producción, la temperatura y las emisiones. Si algún parámetro se desvía de lo esperado, el gemelo virtual puede detectar la anomalía y usarla para posteriores análisis. Esta forma de operar cambia la evaluación ambiental en un proceso continuo, en lugar de revisiones esporádicas.

La representación ecológica es un componente clave, permitiendo ver la relación entre las actividades del sistema y su impacto en la biosfera. Incorpora, si se desea, factores como las emisiones de gases de efecto invernadero, la demanda hídrica, la producción de desechos, el uso de insumos materiales y la condición general del ambiente. En función de la meta trazada, este modelo se vale de metodologías de análisis de ciclo de vida, proyecciones estadísticas, formulaciones físicas o bien heurísticas de aprendizaje automático. Su propósito reside en plasmar con un grado de exactitud adecuado las conexiones requeridas para escrutar los efectos ambientales de diversas determinaciones (Olawade et al., 2026).

El modelo económico, este marco de trabajo, da la pauta para enriquecer la perspectiva ambiental al integrar datos vitales sobre costos, ingresos, inversiones, productividad y la

manera en que se aprovechan los recursos. Esta integración, una necesidad perentoria, resulta clave porque las decisiones que atañen al medio ambiente casi siempre chocan con las murallas de las limitaciones financieras y productivas. Ciertas opciones, quizá, puedan mitigar emisiones, pero seguro requerirán un desembolso de capital inicial bastante cuantioso; en cambio, otras opciones más variadas, con desembolsos menores, quizás consigan una reducción ambiental más tímida. El gemelo digital, esa maravilla tecnológica, nos da la potestad de cotejar tales opciones al unísono, brindando así una visión nítida de sus consecuencias, tanto económicas como ambientales.

La incorporación de un modelo climático, un plus que no se debe subestimar, impulsa la figuración de esas circunstancias externas que pudieran alterar el funcionamiento normal del sistema. Factores como la temperatura, cuánta lluvia cae, si hay agua de sobra o escasea, sucesos extremos inesperados o las previsiones climáticas futuras, todo eso se puede meter en las simulaciones. Esto permite explorar, por dar un ejemplo, cómo una fábrica, una planta productiva, reaccionaría ante tiempos largos de sequía o ante olas de calor insoportables. La integración de información climática transforma el gemelo digital en una herramienta no solamente orientada a la mitigación de impactos, sino también a la evaluación de riesgos y capacidad de adaptación.

La simulación constituye una de las funciones más importantes del gemelo digital ambiental. Antes de implementar una determinada medida, pueden modificarse virtualmente las variables del sistema para estimar sus posibles consecuencias. Una empresa podría simular la sustitución de una fuente energética, la incorporación de maquinaria más eficiente, el aumento de materiales reciclados o la modificación de sus procesos logísticos. Contrastar estas opciones trae a luz posibles beneficios y desventajas sin que sea preciso ensayar primero en el organismo real.

La simulación es capaz de conjugarse con modelos a futuro para medir el desenvolvimiento futuro del desempeño ecológico. Los algoritmos podrían examinar datos pasados y presentes con el fin de pronosticar el consumo de energía, la emisión de contaminantes, la generación de residuos o la aplicación de materias. Tales proyecciones están aptas para ser actualizadas conforme llega nueva información al sistema. De esta manera, el gemelo digital no representa únicamente el estado actual de una organización o territorio, sino que también proporciona una visión dinámica de cómo podría evolucionar bajo diferentes condiciones (Olawade et al., 2026).

La recomendación automática constituye una etapa más avanzada del sistema. Una vez identificadas diferentes alternativas, los algoritmos pueden evaluar sus resultados y recomendar aquellas que presentan mejores condiciones de acuerdo con determinados objetivos. Por ejemplo, puede buscarse minimizar simultáneamente emisiones y costos, reducir consumo de agua o maximizar la recuperación de materiales. La recomendación debe considerar las restricciones reales del sistema y permitir la intervención de responsables humanos. De esta forma, la inteligencia artificial actúa como mecanismo de apoyo y no necesariamente como sustituto de la decisión institucional.

En la economía circular, los gemelos digitales auxiliarán sustancialmente en la supervisión de bienes, insumos y productos a lo largo de su ciclo vital. La información acerca del uso, mantenimiento y estado de los artículos ayuda a discernir el momento correcto para reparar, reutilizar, restaurar o reciclar un componente. Por ende, esto facilita la conservación de materiales y permite extender la vida útil de los recursos. De igual modo, podría facilitar la identificación de oportunidades para recuperar componentes que, anteriormente, habrían terminado como residuos.

La aplicación del gemelo digital en la gestión energética permite identificar oportunidades de eficiencia mediante el seguimiento permanente de los patrones de consumo. Los modelos deben tener la capacidad para cotejar el consumo real versus los valores previstos y así identificar diferencias. A su vez, son posibles de simular modificaciones en patrones de operación, sistemas de climatización, equipos o fuentes de energía. En grandes instalaciones, esta habilidad tiene el potencial de propiciar reducciones considerables en costos y demandas. La evaluación ambiental demuestra la pericia de vincular de modo directo con indicadores financieros y cuantificar el retorno monetario de iniciativas de mejora.

En cuanto al dominio territorial, un modelo digital de una ciudad o de una infraestructura tiene la capacidad de fusionar datos relacionados con el desplazamiento de personas, el consumo energético, el suministro hídrico, la gestión de desechos, las estructuras construidas, los parámetros meteorológicos y el uso que se hace del terreno. Esto permite simular las consecuencias de diferentes políticas urbanas antes de aplicarlas. Por ejemplo, puede evaluarse cómo una modificación del sistema de transporte podría afectar consumo energético, emisiones y congestión. También pueden analizarse escenarios de expansión urbana, gestión hídrica o adaptación frente a eventos climáticos. La capacidad de

representar múltiples sectores permite analizar interacciones que serían difíciles de estudiar mediante modelos independientes.

De acuerdo con Olawade et al. (2026), la implementación de gemelos digitales presenta también limitaciones técnicas y económicas. La construcción de estos sistemas requiere infraestructura digital, sensores, conectividad, capacidad de almacenamiento y profesionales especializados. Continuamente, modelos necesitan ser actualizados, calibrados para mantener su utilidad. La interoperabilidad entre plataformas, a veces distintas, puede presentar dificultad integrando la información. También hay que considerar ciberseguridad, la protección de datos, la gobernanza informativa, específicamente con gemelos representando infraestructuras estratégicas o procesos de negocio sensibles.

La importancia del gemelo digital medioambiental radica en su aptitud, la cual une observación, modelado, predicción y decisión en un marco único. La unificación de informaciones medioambientales, económicas y climáticas permite evaluar no tan solo el devenir, sino qué podría suceder frente a distintas opciones de acción. Por consiguiente, la tecnología tiene potencial de aminorar la duda en las resoluciones e impulsar métodos preventivos. Su empleo emerge particularmente crucial al pretender amalgamar productividad financiera, mengua de consecuencias, reciclaje de activos y acomodo al clima en un sistema dinámico de administración.

4.6. Sistema de alerta ambiental predictiva

Un sistema de alerta ambiental predictiva se presenta como un instrumento tecnológico cuya finalidad es anticipar escenarios que pudieran ocasionar repercusiones adversas en el medio ambiente, las estructuras productivas o la población. En contraste con los métodos de vigilancia convencionales, que usualmente documentan sucesos tras su ocurrencia, los sistemas de índole predictiva recurren a datos históricos, información en tiempo real y marcos de inteligencia artificial para evaluar la posibilidad de acaecimientos venideros. Su implementación autoriza una metamorfosis radical en la administración medioambiental, y transitamos desde una posición mayormente reactiva hacia un sistema fundamentado en la profilaxis y la precognición.

La conformación de estos sistemas arranca con la recopilación constante de datos del medio ambiente y de la industria. Dispositivos IoT, estaciones meteorológicas, satélites,

expedientes empresariales, redes eléctricas y repositorios públicos están facultados para entregar información sobre el estado corriente del sistema. Después se procede a procesar y arreglar estos datos para discernir pautas importantes. La incorporación de variados orígenes capacita la evaluación combinada de factores que podrían afectar un peligro concreto, acentuando de esta manera la habilidad del sistema para dar avisos con mayor antelación.

La proyección de residuos es una de sus funciones más notables. Los modelos son capaces de utilizar información previa acerca de la elaboración, el gasto, la periodicidad anual, las cualidades inherentes de los artículos y los comportamientos de los compradores con el fin de aproximar la cantidad y naturaleza de los desechos que se podrían generar. En el ámbito empresarial, esta información permite planificar la capacidad de almacenamiento, recolección y tratamiento. En los gobiernos locales, puede utilizarse para optimizar rutas de recolección y anticipar incrementos de demanda en determinados períodos (Jinez, 2025).

La predicción también puede contribuir a identificar cambios en la composición de los residuos. El análisis de información histórica puede determinar qué materiales presentan mayor probabilidad de ser descartados en determinados procesos o períodos. Estos datos son valiosos mucho para delinear tácticas de reaprovechamiento y reciclaje. Al consolidar información con evaluaciones automáticas, salen oportunidades para discernir artículos que prometen recompensa financiera máxima. Consecuentemente, el aviso predictivo ayuda mucho tanto a la reducción de desechos como a la reinserción de sustancias.

La anticipación de vertimientos permite prever aumentos posibles de sustancias perjudiciales o gases de efecto invernadero que emanan de cambios en la cadencia de fabricación. Esquemas de estudio: Ellos pueden correlacionar magnitudes fabricadas, energía gastada, propiedades del combustible, estado atmosférico y eficiencia de maquinaria. Cuando se percibe una probabilidad alta de sobrepasar límites definidos, la plataforma puede dar un aviso para iniciar acciones correctivas. Esto facilita una intervención antes de que la degradación del medio ambiente llegue a etapas críticas.

La predicción de liberaciones también servirá para optimizar la administración de procesos fabriles. Si la plataforma distingue patrones que vinculan a incrementos en vertimientos, es capaz de determinar qué estados de operación se asocian con tales manifestaciones. La organización puede entonces modificar parámetros de producción,

llevar a cabo mantenimiento o ajustar el consumo energético. Esta habilidad hace que la información ambiental sea un dispositivo de control operativo. También dejarán vincular la reducción de emisiones con probables ahorros económicos provenientes de una usanza más efectiva de combustibles y recursos. La predicción del consumo energético representa otra aplicación relevante. Los sistemas inteligentes son capaces de examinar datos del pasado, patrones climáticos, rutinas de operación, requerimientos productivos y la forma en que se comporta la maquinaria para proyectar cuánto consumirán en el futuro. Estas proyecciones son muy útiles para detectar momentos de alta demanda y así poder implementar tácticas para reducir el consumo o trasladar algunas tareas a períodos de menor demanda. Dentro de fábricas y edificios, esta capacidad puede lograr un mejor uso de la energía y reducir la contaminación indirecta relacionada con la electricidad que utilizamos.

De acuerdo con Lighezzolo et al. (2016), estos sistemas predictivos también están en condiciones de incluir información sobre la cantidad de energía disponible proveniente de fuentes limpias y su procedencia. La producción de fuentes como energía solar o eólica depende de condiciones climáticas variables. La inteligencia artificial se capacita para analizar datos meteorológicos con el propósito de estimar la generación futura y facilitar la planificación del consumo. Este tipo de data sirve para balancear la demanda y la oferta energética, además de disminuir la dependencia de fuentes de mayor intensidad carbónica. La integración de estas predicciones podría permitir avances hacia sistemas energéticos más flexibles y eficientes.

El estrés hídrico representa otro ámbito de aplicación, sobre todo importante. Los modelos son capaces de conjuntar información sobre precipitaciones, temperatura, niveles de reservorios, humedad del suelo, consumo de agua y proyecciones climáticas con el fin de estimar situaciones futuras de escasez. Una alerta temprana permite cambiar patrones de consumo, priorizar determinados usos o activar mecanismos de contingencia. En actividades agrícolas e industriales, esta habilidad es capaz de reducir pérdidas económicas y facilitar una gestión más eficiente de un recurso limitado.

Detectar de antemano peligros ambientales podría abarcar eventos tales como desbordamientos de ríos, conflagraciones en áreas boscosas, polución atmosférica, deterioro de la tierra o sucesos meteorológicos severos. La conjunción de fotografías satelitales, dispositivos sensores y modelos pronósticos posibilita reconocer alteraciones

que pueden señalar una coyuntura de peligro. Los aparatos poseen la capacidad de distinguir parámetros y ocasiones, dictaminando el momento exacto para disparar una alarma. Este rasgo se pone sumamente crucial cuando la diferencia entre las señales iniciales y el acontecimiento inminente es pequeña.

Algo fundamental se trata en el ajuste de los límites de alarma y los esquemas de respuesta. Una anticipación no sirve de nada para aliviar riesgos si no hay acciones a seguir. El sistema puede clasificar situaciones según su nivel de seriedad y crear directrices diferentes para cada nivel. Un aviso temprano podría requerir más observación, mientras que una señal grave precisaría acción inmediata. El triunfo reside en que las entidades y grupos tengan guías claras para entender las señales y actuar adecuadamente.

La inteligencia artificial puede mejorar estas bases con modelos de aprendizaje automático que refinan las predicciones al incorporar nueva información. Esto permite adaptar el modelo a cambios en los patrones ambientales y productivos. Sin embargo, los resultados dependen de la calidad de los datos, representatividad de las muestras y estabilidad de las relaciones utilizadas. Un sistema que funciona correctamente en determinadas condiciones puede presentar errores cuando enfrenta situaciones completamente diferentes a las observadas durante su entrenamiento.

La implementación de sistemas de alerta predictiva requiere también interoperabilidad entre instituciones y plataformas tecnológicas. Los peligros ambientales, trascendiendo las fronteras políticas y ámbitos sectoriales, demandan un intercambio fluido de datos entre administraciones públicas, corporaciones, grupos ciudadanos y equipos de respuesta. El entendimiento recíproco, por otro lado, posibilita la omisión de esfuerzos duplicados y la aceleración de la reacción. Una administración eficaz de los datos se hace fundamental para definir responsabilidades, protocolos, canales de comunicación y estrategias proactivas de salvaguardia (Jinez, 2025).

Desde un ángulo económico, la ventaja primordial de la alerta ambiental predictiva radica en mermar los gastos que vienen aparejados a una respuesta tardía. El poder prever una disrupción en la producción, un faltante de agua o una elevación en las emisiones facultaría la adopción de medidas de antemano, incluso antes de que las repercusiones se agiganten. Las inversiones en prevención suelen ser menos cuantiosas que aquellas destinadas a la recuperación de la compostura o a la caída en el rendimiento laboral. Por

consiguiente, los dispositivos se presentan como instrumentos de gestión de peligros con capacidad de reportar ganancias simultáneas en la esfera ambiental económica.

La integración de los pronósticos de los desechos efluvios, la potencia hidrográfica y los peligros meteorológicos posibilitan la edificación de aparatos de calibración ecológica más exhaustivos. A la oposición, desmenuzar cada factor por separado; los datos pudieran entrelazarse para discernir interconexiones y repercusiones colectivas. Un incremento de temperatura, por ejemplo, puede aumentar el consumo energético y simultáneamente intensificar el estrés hídrico. Un sistema predictivo integrado puede detectar estas relaciones y generar recomendaciones coordinadas. Así, la inteligencia artificial se convierte en una herramienta para anticipar problemas ambientales complejos y apoyar decisiones preventivas.

Figura 4.3. Integración de Indicadores Ambientales para la Toma de Decisiones Preventivas



Elaboración: Autores

4.7. Inteligencia artificial explicable para decisiones ambientales

La inteligencia artificial explicable (IAX) emerge como solución ante una limitación crítica de ciertos modelos de aprendizaje automático: su opacidad inherente en el proceso de predicción o recomendación. En la evaluación ambiental, esta característica cobra una importancia considerable debido a que las determinaciones tomadas pueden repercutir

significativamente en inversiones, la gestión de recursos naturales, el desarrollo de infraestructura y el bienestar de comunidades enteras. Por ejemplo, un modelo que pronostique un riesgo elevado de contaminación tiene que ofrecer la capacidad de discernir las variables que condujeron a dicha conclusión. En consecuencia, la explicabilidad, por ende, permite enriquecer la precisión del algoritmo con pilares de transparencia y rendición de cuentas.

Según Zhao y Fariñas (2022), la transparencia algorítmica implica conocer, en la medida de lo posible, qué información utiliza un modelo, cómo se procesa y bajo qué criterios produce sus resultados. En sistemas ambientales, esta transparencia facilita la evaluación de las decisiones y permite identificar posibles errores. También favorece la confianza de empresas, instituciones públicas y ciudadanos que dependen de las recomendaciones del sistema. Una herramienta que determina que una zona presenta elevado riesgo climático debería proporcionar información suficiente para comprender las variables que sustentan dicha clasificación.

La interpretabilidad se conecta con la aptitud de asimilar la incidencia de las diversas variables empleadas por el modelo. Por ejemplo, ciertos algoritmos, como unos árboles de decisión particulares, muestran arquitecturas bastante directas de asimilar. Otros modelos, no obstante, pueden operar como sistemas de difícil apreciación directa; complicados son. Las metodologías de XAI se proponen facilitar entendimientos acerca de la trascendencia de las variables. Sus propuestas facilitan entender las causas que fundamentan un pronóstico. En el dominio ambiental, esto facilita dilucidar si elementos como la temperatura, el consumo energético, la manufactura o la provisión de agua están influyendo considerablemente en la conclusión.

La explicabilidad se demuestra especialmente crucial cuando los modelos son aplicados a determinaciones de significativa repercusión ambiental. Una sugerencia automatizada pudiese fijar dónde acometer desembolsos en infraestructura. También determina qué procesos de fabricación alterar. O qué regiones necesitan acciones de ajuste. Si los encargados desconocen los fundamentos de la sugerencia, resulta arduo valorar. Es arduo valorar si esta se halla en concordancia con las circunstancias fácticas. La interpretación humana permite complementar el resultado estadístico con conocimientos técnicos, económicos y territoriales que el algoritmo puede no haber incorporado.

Los sesgos algorítmicos son un riesgo muy importante para los sistemas de inteligencia artificial. Es posible que un modelo perpetúe o incluso agrave los sesgos presentes en sus datos de entrenamiento. Por ejemplo, si unas zonas geográficas tuvieron menos estaciones de monitoreo ambiental en el pasado, un modelo podría no tener suficiente información sobre sus condiciones reales. Por eso esto pudiera llevar a pronósticos menos precisos justo en las áreas que más necesitan una evaluación exacta. La identificación y corrección de estos sesgos constituye una condición necesaria para desarrollar sistemas ambientalmente confiables.

La probidad de los datos afecta la fiabilidad de los algoritmos directamente. Predicciones equívocas pueden surgir por datos que están incompletos, desfasados, carentes de coherencia o con errores métricos, incluso si el algoritmo elegido es sumamente avanzado. En la esfera de la evaluación ambiental, la proveniencia de los datos de sensores, satélites, corporaciones, estamentos gubernamentales y diversas organizaciones implica la posible manifestación de disparidades metodológicas entre las procedencias. La purga, el escrutinio y la estandarización de la información han de ser componentes inseparables de la arquitectura del sistema.

La inteligibilidad habilita la localización de nexos insólitos o hallazgos atípicos. Si una unidad de cómputo determina que un factor en apariencia periférico posee una repercusión significativa sobre las emanaciones o el gasto de materias primas, los académicos podrán escrutar tal vínculo y dilucidar si se debe a un actuar genuino o a una particularidad inherente a la información. De esta forma, la inteligencia artificial trasciende su rol de mero pronóstico para erigirse en un sistema catalizador de saber ecológico. La decodificación faculta la confrontación de los veredictos algorítmicos con principios científicos y de índole financiera.

La responsabilidad de las decisiones automatizadas constituye otra dimensión fundamental. Cuando un sistema recomienda cerrar temporalmente una instalación, modificar un proceso o intervenir una determinada infraestructura, debe existir claridad sobre quién valida y ejecuta la decisión. La automatización no elimina la responsabilidad institucional. Por el contrario, requiere establecer mecanismos de supervisión, documentación y auditoría que permitan determinar cómo se produjo una recomendación y quién autorizó su aplicación. Esto resulta especialmente importante cuando una decisión

puede generar costos económicos o consecuencias sociales significativas (Zhao y Fariñas, 2022).

La gestión algorítmica ambiental ha de incorporar directrices referentes a apertura, robustez, renovación y examen incesante. Las configuraciones modulares corren el riesgo de mermar su exactitud ante variaciones en el entorno, la esfera económica o la esfera tecnológica sobre las cuales operaron originalmente. Un paradigma instituido mediante información del pasado podría manifestar respuestas insuficientes frente a sucesos climáticos severos que no fueron incluidos en el conjunto de datos original. Atendiendo a esta coyuntura, es imperativo que los algoritmos transiten por fases rigurosas de corroboración y puesta al día para garantizar su perdurable pertinencia dentro de los escenarios operativos.

La XAI igualmente contribuye a la mejora de la creación de normativas ambientales. Las administraciones tienen la capacidad de utilizar modelos pronósticos para identificar zonas susceptibles, calcular emanaciones futuras o fijar exigencias de equipamiento. Sin embargo, el uso de estos pronósticos en directrices gubernamentales requiere la comprensión de los factores que sostienen los desenlaces. La inteligibilidad hace factible la confrontación entre diversos supuestos y la argumentación de por qué una acción concreta pudiera originar más provechos que una distinta. Esto facilita una toma de decisiones basada en evidencia y mejora la capacidad de rendición de cuentas.

Desde una óptica económica, la inteligibilidad coadyuva a la disminución de la perplejidad vinculada a las apuestas medioambientales y tecnológicas. Una compañía se encuentra en posición de emplear un sistema para escoger una táctica de eficacia energética; no obstante, requerirá asimilar cuáles son los influjos que definen el ahorro estimado y qué riesgos están correlacionados. Una descripción nítida faculta la confrontación de la sugerencia frente a opciones y la ponderación de su afinidad con las metas dinerarias. La inteligencia artificial emerge entonces con una significación acrecentada al momento en que sus determinaciones se integran en rumbos de proyección y valoración económica.

La combinación entre precisión, interpretabilidad y responsabilidad resulta fundamental para desarrollar sistemas de inteligencia artificial ambientalmente confiables. La máxima precisión predictiva no debería considerarse suficiente si el modelo genera resultados imposibles de explicar o presenta sesgos significativos. Del mismo modo, un modelo

fácilmente interpretable puede ser insuficiente si sus predicciones presentan errores elevados. El desafío consiste en encontrar un equilibrio entre capacidad predictiva y comprensión de los resultados, especialmente cuando las decisiones afectan recursos naturales, actividades económicas y bienestar social (López et al., 2024).

La inteligencia artificial explicable permite avanzar hacia una evaluación ambiental basada en decisiones verificables y auditables. Los resultados de los algoritmos pueden complementarse con información sobre las variables utilizadas, niveles de incertidumbre, posibles sesgos y justificación de las recomendaciones. Esta estructura facilita que los sistemas inteligentes sean utilizados como herramientas de apoyo dentro de procesos de decisión responsables. La incorporación de explicabilidad permite que la inteligencia artificial no sea únicamente un mecanismo de automatización, sino una infraestructura de conocimiento capaz de contribuir a decisiones ambientales más transparentes, fundamentadas y técnicamente defendibles.

4.8. Índice de Inteligencia Ambiental

El Índice de Inteligencia Ambiental (IIA) podría conceptualizarse como un instrumento diseñado para cuantificar la aptitud de una entidad, organización, demarcación geográfica o sistema de producción para emplear datos, avanzadas herramientas digitales e inteligencia artificial para administrar sus repercusiones ecológicas. La meta intrínseca radica en trascender una valoración meramente centrada en los logros ambientales e incorporar además la destreza de anticipación, el manejo de información y una reacción pronta. De esta forma, una empresa sería evaluada no tan solo por cuánta contaminación genera, sino también por su habilidad para detectar, prever y administrar su descarga de desechos tóxicos eficientemente.

La proposición de cálculo tendría esta apariencia: $IIA = f(\text{capacidad predictiva} + \text{calidad de datos} + \text{automatización} + \text{anticipación} + \text{eficiencia ambiental})$. Estas cinco dimensiones existen para perfilar las facetas de la inteligencia que se aplican a la gestión ecológica. La competencia predictiva se refiere a la capacidad de anticipar acontecimientos futuros; la confiabilidad informativa estima la seguridad de los datos que se manejan; la automatización muestra cuánto se ha adoptado la tecnología; la anticipación aprecia la capacidad de actuar antes de que surja un resultado; y el desempeño ambiental abarca los logros obtenidos mediante estas capacidades.

La habilidad de prever es un fundamento del baremo, demostrando el nivel hasta donde una organización adivina cambios en sus bases elementales de su entorno. Esto se calcula, quizás, usando mediciones ligadas a la precisión de las estimaciones sobre emisiones, el consumo de energía, la generación de residuos, el uso de agua o la exposición a sucesos climáticos negativos. Un grupo que posea la estructura necesaria para anticipar transformaciones ecológicas muestra una capacidad organizacional más desarrollada. La evaluación tiene que considerar, además, el éxito real de los modelos frente a datos actualizados, no solamente su rendimiento durante el entrenamiento (Navarro, 2011).

La calidad de los datos constituye la base informativa sobre la que se sustentan los sistemas de inteligencia artificial. La valoración se realizará mediante criterios como la facilidad de acceso, la exactitud, la actualidad, la coherencia, la trazabilidad y el alcance de la información. Una compañía podría contar con flujos de trabajo complejos; sin embargo, si su información es errónea o escasa, sus decisiones ambientales estarán condicionadas por esa deficiencia. De esta suerte, esta dimensión debería ocupar una posición relevante en la métrica y abarcar tanto la calidad técnica como la capacidad de la estructura para gestionar los datos.

El alcance de la autonomía ecológica permite indagar en qué medida una entidad despliega herramientas digitales para supervisar y dirigir sus procesos. Esto podría englobar la incorporación de sensores, mecanismos de ajuste autónomo, herramientas de análisis y ciclos operativos capaces de ejecutar determinadas acciones sin la necesidad constante de intervención humana. La automatización podría facilitar una respuesta veloz ante desajustes ambientales y reducir las equivocaciones cometidas por las personas. Aun así, un mayor nivel de automatización no debería ser considerado automáticamente como un incremento en la productividad, pues igualmente trae consigo costos energéticos, tecnológicos y económicos vinculados a su implementación.

La anticipación se revela como una faceta distinta de la predicción; no solamente abarca el discernimiento de sucesos probables, sino que adicionalmente entraña la capacidad de instaurar medidas precautorias. Aun un sistema que prediga con solidez un aumento de emisiones, si esa entidad carece de procedimientos para actuar, su capacidad de manejo quedará limitada. La métrica deberá valorar la presencia de mecanismos para transmutar las pronósticos en estrategias con impacto real. Esto puede incluir sistemas de alerta

temprana, protocolos de emergencia, mantenimiento predictivo y mecanismos de planificación ambiental.

La dimensión de eficiencia ambiental entrelaza la inteligencia tecnológica con las repercusiones tangibles. Esta puede comprender métricas asociadas a la disminución de emisiones, el consumo energético, el aprovechamiento hídrico, la generación de desechos y la optimización del empleo de materiales. Adicionalmente, se podrían integrar métricas de índole económica, tales como las economías de costos resultantes de una administración de recursos más acuciosa. El propósito cardinal reside en precaver que el índice solo pondera la tecnología instalada sin evaluar sus alcances reales. Una entidad que posea una infraestructura digital de vanguardia tendría que evidenciar que tal potestad devenga en progresos ambientales que se puedan corroborar (Navarro, 2011).

Para construir el IIA, resulta necesario seleccionar indicadores específicos para cada dimensión. Por ejemplo, la capacidad predictiva podría medirse mediante precisión de modelos; la calidad de datos, mediante porcentaje de información actualizada y validada; la automatización, mediante proporción de procesos monitoreados digitalmente; la anticipación, mediante tiempo promedio de respuesta antes de un evento; y la eficiencia, mediante reducción porcentual de impactos ambientales. Estos indicadores pueden adaptarse a las características de empresas, municipios, instituciones educativas o territorios.

La normalización de los indicadores resulta necesaria porque las variables utilizadas pueden expresarse en diferentes unidades. Un indicador puede medirse en toneladas de CO₂e, otro en porcentaje y otro en horas de anticipación. Para combinarlos en un índice común, deben transformarse a una escala comparable, por ejemplo, de 0 a 100. Para esos indicadores que sugieren avance favorable, donde un monto superior equivale a un desenlace más positivo, se puede optar por una normalización lineal. En cuanto a los indicadores adversos, en los cuales un valor elevado señala un escenario menos deseable, es menester ejecutar una mutación inversa.

La ponderación, decisión metodológica clave, define la relevancia inherente de cada componente dentro del índice agregado. Una distribución equitativa de estos pesos representa una táctica mesurada para eludir que una única faceta ejerza una influencia desproporcionada en el cómputo final. Aparte, otra alternativa comprende la aplicación

de técnicas estadísticas y multicriterio, habilitando la fijación de estas ponderaciones conforme a la relevancia comparativa de cada fragmento. De la misma manera, consultar a expertos proporciona un cauce crucial para determinar el peso relativo de las diversas consideraciones. Ciertamente, toda elección metodológica deberá estar fundamentada extensamente y respaldada por un análisis riguroso de sensibilidad, garantizando que variaciones en las ponderaciones no alteren sustancialmente la jerarquización posterior.

Este índice resulta de utilidad para forjar un mecanismo astuto de categorización de la madurez ecológica. Puntuaciones modestas podrían denotar organizaciones con escasas infraestructuras para acopiar datos y una administración medioambiental primordialmente reactiva. Organizaciones en niveles intermedios, muy posiblemente emplean monitoreo digital y modelos predictivos, pero exhiben deficiencias en cuanto a automatización o bien en la agilidad de respuesta. Por su parte, niveles superiores con mayor probabilidad van a reflejar sistemas distintivos por tener información de muy alta calidad, predicciones avanzadas, una automatización que es sustancial, protocolos de alerta temprana y optimizaciones ambientales que resultan posibles de verificar. Esa categorización hará posible reconocer las preferencias de gasto, además de las oportunidades de cambio.

El uso corporativo de la IIA podría coadyuvar a los dictámenes que conectan la erogación tecnológica, la eficiencia energética, el cuidado ambiental, el manejo de desperdicios y la climatización. Una compañía podría comparar su grado de inteligencia ambiental con el de otras entidades o estudiar su evolución a través de diferentes períodos. Los hallazgos permitirían saber cuáles dimensiones necesitarían más fondos. En el ámbito regional, las municipalidades, gobernaciones también, podrían utilizar el indicador para calibrar la fuerza de sus mecanismos de vigilancia y prevención ecológica, apoyando en el diseño de directivas gubernamentales.

El IIA también funcionaría como una herramienta para la observación longitudinal. Una evaluación, bien sea anual o semestral, facilitaría determinar si el despliegue de sensores, inteligencia artificial, sistemas de alerta o bases de datos está de veras optimizando la administración ecológica. La progresión del indicador se podría cruzar con índices de emisiones, uso de energía, desechos y gastos. Este vínculo ayudó a determinar si la expansión de la capacidad tecnológica se acompaña con avances ecológicos tangibles y a prevenir que la virtualización se perciba como un fin absoluto (Gams et al., 2019).

Un rasgo esencial del indicador debía ser su habilidad de amalgamar la funcionalidad técnica y la excelencia ecológica. Su propósito no es galardonar colectividades con abrumadoras colecciones de utilidades digitales, sino a las que implementan la tecnología apropiadamente para prever y aminorar sus efectos. Por lo tanto, la eficacia ecológica tendría que funcionar como un componente crucial del resultado. Un mecanismo sumamente automatizado, que sea muy demandante de energía y no promueva progresos ecológicos, debería obtener una puntuación menor que otro mecanismo tecnológico más básico, pero que presente óptimos resultados.

La elaboración del Índice de Inteligencia Ambiental permitirá forjar un fundamento cuantitativo para estimar la evolución de los sistemas inteligentes adoptados en la administración ambiental. Su conformación se amolda a tamaños y empresas distintas, eligiendo señales específicas. La mezcla de capacidad predictiva, datos ideales, automatización, conocimiento previo y sostenibilidad permite analizar no solo el estado técnico, sino también su capacidad verdadera para disminuir riesgos y mejorar las prácticas ambientales. Siguiendo esta línea, el índice brinda una guía para sentar bases en transformaciones digitales hacia logros ecológicos que se pueden medir y verificar.

Figura 4.4. Dimensiones del Índice de Inteligencia Ambiental (IIA)



Elaboración: Autores

4.9. Riesgo de la propia digitalización

La metamorfosis digital puede generar provechos significativos para el entorno por la mejora de procedimientos, merma de desechos, manejo óptimo de lo necesario y elevación de la habilidad de anticipar. No obstante, la armazón técnica que se precisa para desempeñar estas acciones también inflige secuelas al ambiente que habrán de contemplarse dentro de una valoración completa. La inteligencia artificial, los puntos de cómputo, los sistemas de comunicación y los aparatos de electrónica precisan vigor, componentes y fuentes nativos a través de diversas fases de su vida útil. Así pues, no se ha de pensar que la digitalización significa por sí misma sustentabilidad.

Una de las amenazas más importantes emana del dispendio de energía por parte de la inteligencia artificial. El adiestramiento y operación de ciertas arquitecturas demandan un poder de cálculo sustancial, sobre todo al lidiar con volúmenes masivos de datos. El consumo de energía se ve afectado directamente por el tamaño de los modelos, la periodicidad de su uso, el equipamiento de hardware implementado y el origen del suministro eléctrico. Si la energía proviene de sistemas con alta carga de carbono, el progreso de la inteligencia artificial puede conducir a un incremento notable de las emisiones. Por esto, las preocupaciones medioambientales han de contemplar tanto el gasto de energía directa como las emisiones conectadas a la producción eléctrica.

De acuerdo con (Maza et al., 2023), señalan que el gasto energético trasciende el entrenamiento de modelos, incluyendo su operación continua o inferencia. Una aplicación utilizada por millones de personas puede generar una demanda acumulada significativa, aun si cada acción individualmente solicita poca energía. Este aspecto se vuelve crucial ante la creciente diseminación de sistemas de IA embebidos en plataformas digitales, aparatos inteligentes y procesos empresariales. La evaluación debe considerar el volumen total de utilización y no solamente la eficiencia energética de una operación individual.

La infraestructura digital se revela como otra fuente de impactos ambientales. Los centros de datos, los servidores, las redes de telecomunicaciones, junto con los sistemas de almacenamiento y equipos de refrigeración, exigen insumos materiales, electricidad considerable y un valioso espacio físico. Adicionalmente, los centros de datos operan requiriendo sistemas de refrigeración para sustentar las óptimas condiciones de su funcionamiento, circunstancia que pudiera intensificar el consumo energético y, a su vez, en función del avance tecnológico empleado, también la demanda hídrica. El progreso

constante de la infraestructura digital necesitaría un examen detallado que incluiría no solo su capacidad tecnológica, sino también la inmensa cantidad de recursos que precisan para garantizar su funcionamiento perenne.

La manufactura de dispositivos electrónicos implica un gran pedido de recursos, tanto materiales elementales como minerales vitales. Para la confección de computadoras, redes de servidores, teléfonos, baterías, sensores y aparejos de comunicación, se requiere una gama de metales y mezclas avanzadas. Por lo tanto, la obtención y el tratamiento de estos componentes podrían acarrear un alto consumo de agua, daños ecológicos, emanaciones sucias y otras secuelas adversas. La expansión acelerada de la inteligencia artificial posiblemente agravaría esta demanda debido a la urgente necesidad de unidades de procesamiento, espacios de memoria, estructuras de guardado y tecnología puntera.

El estar atado a minerales escasos acarrea además peligros financieros y de política exterior. La concentración territorial de ciertos elementos puede crear fragilidad ante cortes de entrega, oscilaciones de precio o límites mercantiles. Mirando desde lo ecológico, una mayor solicitud de materiales puede impulsar nuevas faenas de extracción en áreas delicadas ambientalmente. La transición digital exige, por ende, planes de eficiencia material, la reutilización de materiales, su recuperación y reciclaje. Estos esfuerzos son esenciales para ver una disminución de nuestra dependencia en materias primas vírgenes.

Los residuos tecnológicos o residuos electrónicos constituyen otra consecuencia de la expansión digital. El rápido reemplazo de dispositivos puede generar grandes cantidades de equipos descartados que contienen materiales potencialmente recuperables y, al mismo tiempo, componentes que requieren una gestión adecuada. Cuando estos residuos no son tratados correctamente, pueden producir impactos sobre el suelo, el agua y la salud ambiental. La economía circular puede contribuir mediante reparación, reacondicionamiento, reutilización, recuperación de componentes y reciclaje de materiales (Maza et al., 2023).

La obsolescencia tecnológica trae consigo una dificultad más. Los dispositivos quizás se cambien, no solo porque no operen, sino porque emergen flamantes versiones de aparatos, sistemas operativos o normativas tecnológicas. Esto deprime la existencia útil real de las manufacturas y aviva la producción de desperdicios. El perpetuo mejoramiento de la

infraestructura también podrá agravar la solicitud de recursos y energía vinculados a su manufactura y su traslado. Una táctica de digitalización viable debería sopesar la resistencia, la coherencia, la posibilidad de compostura y la ocasión de renovación de los aparatos.

El peligro ambiental podría ascender igualmente si la eficacia tecnológica desata un rebote desmedido. Una herramienta tecnológicamente superior puede disminuir el precio de explotar un recurso específico y, de ahí, subsecuentemente, avivar la pretensión total de utilidad. Por vía de ejemplo, un alza en la eficiencia de las arquitecturas digitales podría incentivar una explotación ampliada de las prestaciones de cómputo y resguardo. En el caso de que la elevación de la pretensión sobrepase las economías adquiridas por cada unidad de utilidad, la repercusión ecológica de conjunto podría exacerbarse. La tasación requerirá, por consiguiente, dilucidar la eficacia en comparación y el consumo, en suma.

El rebound effect digital puede manifestarse en diferentes niveles. En el nivel directo, una reducción del costo de utilización puede provocar un mayor consumo del mismo servicio. De forma indirecta, los recursos que se economizan podrían redirigirse hacia otras tareas y esto, asimismo, ocasiona afecciones medioambientales. En un plano sistémico, la digitalización posibilita la transformación de las pautas productivas y de consumo e impulsa el surgimiento de nuevas facetas económicas. Dichas interconexiones hacen laboriosa la dilucidación del saldo ecológico de una innovación si solamente se examina su operación presente.

La digitalización, adicionalmente, es capaz de originar consecuencias de sustitución, las cuales manifiestan réditos medioambientales diversos según las circunstancias. Una junta virtual tendría la capacidad de mermar viajes y el gasto de carburantes; no obstante, exige aparatos, infraestructuras de red y centros de cómputo. Un portal de comercio electrónico sería capaz de mejorar ciertas gestiones de transporte, pero a su vez puede acrecentar la profusión de repartos y envolturas. Un dispositivo digital de vigilancia lograría menguar mermas en una industria, pero podría incrementar la cuantía de sensores y equipos montados. Cada escenario precisaría contrastar la opción digital con la coyuntura que viene a reemplazar.

Dando vueltas a la economía, la digitalización presenta un riesgo que se puede ver como una externalidad tecnológica si los costos ambientales que provienen de la infraestructura digital no se tienen en cuenta apropiadamente en las decisiones de inversión. Un negocio

puede sacar ventajas económicas adoptando una nueva tecnología, aunque los costos ambientales los paguemos entre todos en la sociedad. Poner en consideración estos impactos tanto en el análisis de ciclo de vida como en la evaluación de costo-beneficio consigue una apreciación más completa sobre las inversiones digitales.

La gestión de riesgos demanda la incorporación de facetas de aprovechamiento energético y de materiales desde las etapas tempranas de diseño de las tecnologías. A través de la aplicación de fuentes renovables, mecanismos de refrigeración eficaces, infraestructuras conjuntas, unidades de procesamiento de bajo requerimiento y arquitecturas de cómputo mejoradas, sería posible atenuar el perjuicio ecológico. De igual forma, al incrementar la longevidad de equipos, reciclando sus componentes y recuperando materiales, se disminuye la necesidad de insumos materiales primigenios. Así pues, la viabilidad a largo plazo de lo digital exige un esfuerzo articulado respecto al gasto energético, los materiales y el manejo de residuos (Fernández, 2022).

Es crucial establecer indicadores rigurosos para computar la huella medioambiental inherente a la digitalización. Dichos indicadores englobarían la necesidad de energía por ciclo de procesamiento, la emisión de gases de efecto invernadero, la utilización de agua, el volumen de materiales utilizados, la resistencia operacional de la maquinaria, la proporción de componentes reutilizables y la acumulación de desperdicios electrónicos. Implementar estos parámetros en marcos de análisis ecológico posibilita el discernimiento comparativo entre divergentes opciones tecnológicas. El escrutinio mediante estas mediciones permite dilucidar si una novedad propicia mejoras ambientales y en qué grado sus consecuencias colaterales podrían anularlas.

La evaluación del riesgo de la propia digitalización permite reconocer que tecnología y sostenibilidad no son conceptos equivalentes. La inteligencia artificial, IoT, Big Data y otras herramientas pueden contribuir considerablemente a reducir impactos cuando se aplican a problemas adecuados y bajo condiciones de eficiencia. Sin embargo, también pueden incrementar el consumo energético, la demanda de materiales, los residuos tecnológicos y los efectos rebote. Por ello, la transformación digital debe evaluarse mediante un enfoque de ciclo de vida que considere los impactos generados y evitados, permitiendo determinar si el resultado final representa realmente una mejora ambiental.



EDITORIAL ANDES COGNITIO

CAPÍTULO V

MODELO INTEGRADO PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE: ÍNDICE, GOBERNANZA Y ESCENARIOS DE TRANSICIÓN



CAPÍTULO V

MODELO INTEGRADO PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE: ÍNDICE, GOBERNANZA Y ESCENARIOS DE TRANSICIÓN

5.1. Del análisis sectorial al modelo integrado

Tradicionalmente, la examinación de la sostenibilidad ha estado influenciada por una perspectiva gremial, por la cual las problemáticas medioambientales, pecuniarias y cívicas se estudian por separado. Dicha concepción faculta la distinción exacta de ciertas coyunturas, más exhibe constricciones cuando las resoluciones de una faena provocan repercusiones a la vez en distintas esferas. Una estrategia dirigida a disminuir vertidos, a manera de muestra, podría trocar las cargas manufactureras, trastocar la energía consumida, suscitar nuevos requisitos tecnológicos y reconfigurar las circunstancias de trabajo. Por lo tanto, la viabilidad amerita un cambio del pensamiento sin ataduras a una captación unificada de los nexos que entrelazan la economía, el ambiente, la ciencia aplicada y la sociedad.

Esta amalgama evidencia una evolución metódica, pues argumenta que las estructuras económicas operan mediante relaciones recíprocas. La explotación de los recursos naturales afecta los gastos y los conflictos ecológicos; los imprevistos del clima inciden en la provisión de insumos clave y el rendimiento productivo; mientras que la incorporación de herramientas tecnológicas altera simultáneamente los modelos de producción y las necesidades energéticas y de materiales. En consecuencia, una evaluación que considere únicamente una de estas dimensiones puede generar diagnósticos parciales. La literatura reciente sobre economía circular demuestra precisamente la utilidad de integrar indicadores ambientales, económicos y de innovación para obtener una valoración más completa del desempeño de un sistema (Medon y Oduleye, 2024).

La dimensión ambiental configura la piedra angular del modelo integrado, al revelar la magnitud de las presiones emanadas de las actividades económicas sobre los entramados ecológicos. Entre el abanico de variables a considerar, hallamos la extracción de recursos básicos, la generación de residuos, el consumo de agua dulce, los efluvios de gases de efecto invernadero, el desembolso energético y el menoscabo de la herencia natural. Mas

estas magnitudes sobrepasan la simple interpretación como señales de degradación; pueden a su vez representar oportunidades propicias para optimizar la eficacia, reducir los costes y promover fases de reciclaje y reinserción de elementos. De este modo, la cuantificación ambiental adopta una valencia intrínsecamente estratégica en el ámbito de la administración económica.

La inserción de variables económicas facilita la comprensión del vínculo existente entre el rendimiento ecológico y la creación de valor. El desembolso en energía, insumos, disposición de desechos y adhesión a normativas ejerce una influencia directa en la ganancia de las corporaciones y las regiones. Paralelamente, las contribuciones a la mejora ambiental pueden originar ventajas a través de un uso optimizado de los recursos, menor desperdicio y el surgimiento de ofertas novedosas. Los estudios más novedosos detectan vínculos beneficiosos entre ciertas métricas de economía circular, progreso e índole competitiva, si bien dichas asociaciones tienden a mutar en función de los atributos institucionales y fabriles de cada jurisdicción.

Las variables climáticas presentan un ángulo suplementario para el estudio; de hecho, el calentamiento global altera los contextos operacionales de las actividades económicas. Tormentas severas, sequías prolongadas, picos térmicos, fluctuaciones en el suministro hídrico y sucesos similares tienen la capacidad de impactar la infraestructura física, las cadenas de abastecimiento globales, la productividad agraria y la abundancia de recursos. De consiguiente, una apreciación ecologista completa debería no solo enfocarse en sumar los efluvios emanados por alguna empresa, sino más bien considerar su debilidad y capacidad para lidiar con los peligros del clima actuales. Así pues, la acomodación se vuelve parte del examen del desempeño, en lugar de quedarse solo en la planificación ecologista.

La esfera electrónica gana importancia por las tecnologías de la información que facilitan una mayor extensión en el medir, el tratar y la gestión de los engranajes de producción complicados. Sensores, bases de datos, inteligencia artificial, sistemas de información geográfica y herramientas de supervisión: estos elementos pueden hacer más sencilla la detección de deficiencias y prever ciertas contingencias. Con todo, la digitalización precisa ser valorada desde un ángulo medioambiental, dado que conlleva infraestructura, energía eléctrica, aparatos electrónicos y materia prima. Por ende, la adopción de tecnología no se asume como una mejora automática en sostenibilidad; su efectividad se

define por los provechos ecológicos resultantes en contraposición con los recursos invertidos en la creación y preservación de tal infraestructura (Medon y Oduleye, 2024).

Las variables sociales, al abordar los efectos de la transformación productiva sobre las personas y grupos, otorgan un complemento holístico al paradigma actual. La deriva hacia esquemas circulares, ostentando robustez climática y un alto grado de digitalización, es capaz de modificar las competencias laborales requeridas, dar pie al surgimiento de empleos inéditos y transformar determinados ámbitos económicos. Sin embargo, esta misma mudanza podría intensificar las brechas si hay trabas en el acceso a tecnologías, infraestructuras o fondos monetarios. Así pues, la noción de perdurabilidad se extiende más allá de la simple eficiencia en la utilización de materiales o energía; pues un cambio ecológicamente favorable que, no obstante, genere exclusión económica o tecnológica, patentiza carencias en la sostenibilidad social intrínseca.

La conjunción de las facetas mencionadas exige desechar la noción de mediciones singulares y aisladas. Un índice que cuantifique las emisiones, por ejemplo, quizás pudiera manifestar una bajada notoria al mismo tiempo que se observase un aumento coetáneo en la apropiación de materias primas o el consumo de agua. Del mismo modo, una empresa puede incrementar su productividad mediante digitalización mientras aumenta su dependencia energética. La evaluación integrada busca identificar estas compensaciones y relaciones entre variables para evitar que una mejora en un componente sea interpretada automáticamente como una mejora global. Las metodologías multicriterio revelan una gran utilidad en esta esfera de acción dada su aptitud para acomodar multiplicidad de metas que, a su vez, pueden manifestarse de forma cooperativa o antagónica.

Los modelos para la toma de decisiones multicriterio, ellos aparecen como útiles herramientas aquí por su habilidad de manejar propósitos varios que son unidos u opuestos. Las decisiones sobre inversión demandan una revisión fuera de lo común financiero, que toma en cuenta el consumo de recursos, las emisiones que no ocurren y las capacidades técnicas logradas. Esta forma de ver las cosas trae un crecimiento de la idea de que la eficiencia es más que solo finanzas, abarcando la ambiental, donde el valor se liga a la capacidad de hacer cosas con menos recursos y la disminución de riesgos futuros.

El enfoque integrado también requiere una dimensión temporal. Las decisiones ambientales producen efectos que pueden manifestarse en diferentes horizontes, mientras que determinadas inversiones tecnológicas pueden presentar costos iniciales elevados y beneficios acumulativos. Por ello, resulta necesario combinar información histórica, situación actual y escenarios futuros. La investigación sobre transiciones de sostenibilidad plantea precisamente la necesidad de analizar procesos de transformación estructural y no únicamente cambios puntuales en determinados indicadores.

Según Vargas et al. (2025), visto desde lo territorial, la integración fomenta la valoración colectiva de características productivas, ambientales, climáticas, tecnológicas y sociales, todas inherentes a un espacio geográfico en particular. Por ejemplo, un municipio podría hacer bien la gestión de residuos, pero sufrir de poca agua, infraestructura digital pobre o ser muy sensible al tiempo extremo. Este estudio conjunto permite definir rumbos y evita el poner en marcha planes desordenados que ignoran las conexiones ocultas entre áreas distintas. De igual modo, usar técnicas estadísticas y bases de datos comparables ayuda a crear medidas que apoyan decisiones de gobierno basadas en información clara.

El pasar de mirar cada área por separado a un enfoque unificado trae consigo, finalmente, el crear conexiones claras entre las cosas que se están mirando, más allá de solo juntar números. Un marco de evaluación piensa integrar datos ambientales, económicos, climáticos, digitales y sociales; después estas variables se pueden estandarizar, se les puede asignar ponderaciones y combinar para sacar indicadores agregados de desempeño. Los modelos multicriterio muestran que es posible transformar indicadores expresados en diferentes unidades en resultados comparables, siempre que exista una metodología transparente de selección, estandarización y ponderación.

5.2. Arquitectura del Modelo de Evaluación Ambiental Integrada

Según López-Santana y colegas (2023), se postula que la arquitectura para un Modelo de Evaluación Ambiental Integrada necesita ser concebida como un sistema, un constructo diseñado para tender puentes entre diversas facetas del desarrollo sostenible, todo ello contenido en un único marco de análisis. Lejos de evaluar, de forma aislada, lo que respecta al desempeño ambiental, al económico o al tecnológico, dicho modelo tiene como finalidad desvelar las complejas interrelaciones que emergen entre estas áreas. Tal enfoque adquiere una significancia particular puesto que las decisiones estratégicas

dirigidas a potenciar una dimensión pueden acarrear consecuencias, ya sean ventajosas o perjudiciales, para las otras. En suma, la arquitectura que se plantea se estructura a través de un conjunto de cinco dimensiones fundamentales: la circularidad inherente a los recursos, la evolución del desempeño climático, la migración hacia una transformación digital que sea intrínsecamente sostenible, un balance entre la eficiencia económica y la protección ambiental, y finalmente, la robustez de la resiliencia socioambiental.

La primera dimensión, o sea, la circularidad de recursos, se centra en dilucidar la eficacia con que un sistema aprovecha, protege y recupera sus insumos materiales. Esta dimensión abarca parámetros como la erogación de materias primas, la proporción de insumos reaprovechados, la recaptación de desechos, la aptitud para el reciclaje, la posibilidad de enmienda y la longevidad de los bienes. Desde un prisma económico, el carácter circular posibilita aminorar la dependencia de elementos primigenios y recortar ciertos gastos inherentes a la compra y eliminación de materiales. Aún más, el escrutinio debe contemplar que la circularidad trasciende el mero acto de reciclar, procurando más bien sostener el máximo valor posible de las elaboraciones y sus constituyentes a lo largo de su trayecto vital.

El segundo componente corresponde al desempeño climático. Esta dimensión permite evaluar tanto las emisiones generadas por las actividades económicas como la exposición frente a los efectos del cambio climático. Entre sus variables pueden incorporarse emisiones de CO₂ equivalentes, intensidad de carbono, consumo energético, exposición a riesgos climáticos y capacidad de adaptación. La evaluación del clima, con el examen de mitigación y adaptación aplicados de manera conjunta, deja de limitarse escuetamente a las emisiones. Inclusive, una organización con escasa emisión, pero vulnerable a eventos como inundaciones, sequías o fallos en la cadena de suministro, podría igualmente presentar un desempeño climático nada ideal.

La tercera faceta en cuestión, por su parte, se relaciona directamente con la digitalización que busca ser tanto transformadora como sostenible. Este aspecto enfoca en descifrar cómo las herramientas digitales coadyuvan al desempeño medioambiental positivo, adoptando precauciones contra la generación de efectos adversos de magnitud. Sensores, inteligencia artificial, Internet de las Cosas, plataformas de datos y sistemas de monitoreo se emplean, permitiendo un incremento en la eficiencia de materiales, energía y agua. Pero, aun así, el consumo energético inherente a la infraestructura digital, la manufactura

de aparatos, los desechos electrónicos, junto al empleo de minerales esenciales, deben ser debidamente sopesados. Por consiguiente, es fundamental que la digitalización sea examinada en función de una balanza: los beneficios ambientales logrados frente a los costos materiales y energéticos que acarrea.

La dimensión cuatro es la eficiencia económica ambiental, la cual busca entrecruzar los resultados ecológicos y los recursos económicos implicados en su consecución. No solamente es suficiente establecer cuánto bajaron las emisiones o los desechos; igualmente se debe averiguar el costo para obtener esta disminución y las ganancias económicas que generó. Tal como el coste ecológico por pieza producida, el ahorro energético, el retorno de proyectos ecológicos, la productividad material y el ahorro que surge de la disminución de desechos son indicadores que podrán integrar este aspecto. Esta óptica posibilita enlazar el manejo ecológico con las elecciones financieras y las operaciones productivas.

La quinta dimensión es la resiliencia socioambiental, la cual significa la aptitud que posee una organización o territorio para prever, soportar, acomodarse y recuperarse ante cualquier alteración, ya sea ambiental, climática, económica o social. Su análisis puede incluir elementos que tengan que ver con infraestructuras sólidas, disponibilidad de recursos, la capacidad que tengan las instituciones para gestionar o actuar ante emergencias, las facilidades tecnológicas al alcance y la implicación activa de la sociedad. El concepto de resiliencia extiende la investigación habitual, ya que su foco no es solo cómo está el sistema ahora, sino en la facultad que él tiene para sostener sus quehaceres ante panoramas futuros llenos de dudas.

Estas cinco dimensiones deben funcionar de manera interdependiente. La circularidad puede disminuir la presión sobre los recursos y mejorar la eficiencia económica; la digitalización puede facilitar la trazabilidad de materiales y el monitoreo climático; mientras que la resiliencia puede reducir las pérdidas económicas ocasionadas por eventos extremos. Sin embargo, también pueden aparecer conflictos. Una tecnología destinada a incrementar la eficiencia material puede requerir elevados niveles de energía, o una estrategia de reciclaje puede generar costos superiores a los beneficios obtenidos. La arquitectura integrada debe ser capaz de identificar estas relaciones y no asumir que todas las variables evolucionan en la misma dirección.

Desde el punto de vista metodológico, la arquitectura puede organizarse en diferentes niveles. En el nivel inicial se encuentran los datos de entrada, procedentes de registros empresariales, sistemas ambientales, sensores, estadísticas económicas, información climática y bases de datos territoriales. En un segundo nivel se ubican los indicadores específicos de cada dimensión. Posteriormente, estos indicadores pueden ser normalizados para hacer comparables variables expresadas en unidades diferentes. Finalmente, los hallazgos es posible integrarlos a través de técnicas de ponderación y agregación, así llegando a una valoración completa del desempeño académico (López-Santana et al., 2023).

La elección de los indicadores representa una fase fundamental; una formulación demasiado extensa podría entorpecer su implementación y ocasionar tropiezos con la información que tenemos. Deberían los indicadores adherirse a los preceptos de pertinencia, accesibilidad, certeza, uniformidad y potencia descriptiva. Resulta igualmente imperativo discernir entre las métricas de logro y las métricas de aptitud. En tal sentido, la aminoración real de emisiones constituye un desenlace medioambiental, en tanto que la presencia de esquemas de vigilancia climática evidencia una potencialidad institucional y de índole tecnológica. Integrar ambos elementos autoriza la valoración tanto del rendimiento conseguido como de las circunstancias que posibilitan su permanencia.

La arquitectura también debería integrar mecanismos de retroalimentación. Aquellos resultados logrados en una evaluación tienen la capacidad de usarse para detectar falencias, priorizar intervenciones y alterar decisiones futuras. Como una muestra, si una compañía ostenta un desempeño alto en circularidad más uno pobre en cuanto a resiliencia climática, los fondos de inversión se podrían dirigir a infraestructura adaptativa. Por consiguiente, el modelo funciona cual mero artefacto estático de clasificación; no obstante, más bien cual herramienta de gestión que promueve la reconfiguración de tácticas según las alteraciones del panorama económico, ambiental y tecnológico.

Según Montero (2023), un atributo esencial del modelo es su adaptabilidad a diversas magnitudes. Dentro de una compañía, las cinco facetas podrán movilizarse para ponderar procesos de producción, redes de distribución o iniciativas de capital. En un ayuntamiento, podrán implementarse para escrutar manejo de desechos, desplazamiento, gasto eléctrico, obras y susceptibilidad a cambios del clima. A nivel geográfico, la idéntica

organización se podría emplear para cotejar industrias productivas y discernir cuáles muestren mayores chances de metamorfosis. Esta maleabilidad permite sostener un esquema de metodología compartida y ajustar las métricas particulares a los rasgos de cada unidad que se investigue.

La arquitectura propuesta debe incorporar finalmente criterios de transparencia y gobernanza de datos. Las decisiones derivadas del modelo dependen de la calidad de la información utilizada, de los criterios de selección de indicadores y de las ponderaciones asignadas a cada dimensión. Por ello, los procedimientos de cálculo deben ser verificables y susceptibles de revisión. La utilización de estadísticas comparables y sistemas de información confiables resulta especialmente importante para evitar que diferencias en la calidad de los datos sean interpretadas erróneamente como diferencias reales de desempeño entre empresas o territorios. La arquitectura del modelo debe convertirse así en una estructura dinámica de información, evaluación y decisión, capaz de conectar desempeño ambiental, eficiencia económica, transformación tecnológica y resiliencia dentro de un mismo sistema analítico.

5.3. Índice Integrado de Transición Sostenible — IITS

La estructuración del Índice Integrado de Transición Sostenible (IITS) debe concebirse como una métrica compleja; su función principal es amalgamar el rendimiento de una entidad organizacional, una zona geográfica o un aparato de producción ante los retos más significativos que implica la transición hacia la sostenibilidad. Pretende ir más allá de la simple aplicación de métricas ambientales aisladas, buscando una aproximación que englobe de manera unificada la reutilización de materiales, la mitigación del cambio climático, la evolución tecnológica digital, la sinergia entre aspectos económicos y ambientales, y la fortaleza social y ambiental. El desarrollo de estos indicadores concuerda con la apremiante necesidad de tener instrumentos adecuados para amalgamar datos de diversos aspectos en entendimientos concretos y operativos, así cimentando la base para resoluciones estratégicas.

La formulación general sugerida para el índice es $IITS = f(CI, CC, TD, EE, RS)$, en la cual CI representa Circularidad Inteligente, CC Desempeño Climático, TD Transformación Digital Sostenible, EE Eficiencia Económico-Ambiental y RS Resiliencia Socio-Ambiental. Cada componente puede estar compuesto por un conjunto

de indicadores específicos que posteriormente son normalizados y agregados. De esta manera, el índice no depende de una única variable ambiental, sino que representa la interacción entre diferentes capacidades y resultados asociados con la transición sostenible (Gudmundsson et al., 2015).

La esfera de la Circularidad Consciente (CC) ha de evaluar la aptitud de un sistema, ya sea para minimizar el empleo de materiales no renovables, extender la utilidad de objetos y componentes, además de recobrar provecho de lo descartado. Entre las mediciones que se podrían contemplar figuran la frecuencia de reutilización de insumos, la proporción de desechos que obtienen algún tipo de valor, la carga de materiales, el uso de recursos de procedencia secundaria, la facilidad para reparar y el tiempo que perduran los artículos. La inclusión del aspecto digital posibilita el ingreso de parámetros atañidos a la rastreabilidad, los mecanismos electrónicos de administración de provisiones y el uso de inteligencia computacional en aras de optimizar los materiales.

La sección Rendimiento frente al Cambio Climático (CC) aborda ambas categorías de acciones: mitigación y aptitud adaptativa. Indicadores pudieran comprender emisiones de gases de invernadero, la intensidad del carbono, consumo energético, integración de energías renovables y cuantía de emisiones que se evitan. Variables ligadas a exposiciones a riesgos climáticos, la infraestructura para la adaptación y la capacidad de reaccionar a incidentes extremos serían elementos adicionales a estos aspectos. Esta combinación permite evitar una interpretación limitada del desempeño climático basada exclusivamente en las emisiones producidas.

La dimensión de Transformación Digital Sostenible (TD) permite discernir el grado en que las tecnologías digitales aportan a la mejora del rendimiento ambiental y económico. Indicadores sobre la empleabilidad de IoT, sistemas de vigilancia ambiental, rastreabilidad digital, inteligencia artificial, procesamiento de datos, así como la automatización de procesos podrían integrarse. Sin embargo, cabe reflexionar sobre las repercusiones inherentes a la estructura tecnológica: el consumo de energía, los desechos electrónicos que generamos y la dependencia de recursos finitos. De hecho, mayor digitalización no promete un mayor indicador si esa digitalización no lleva aparejada equitativas recompensas ambientales.

La Eficiencia Económico-Ambiental (EE): Esta se configura como un nexo crucial entre el resultado ecológico y los gastos financieros. Así, hay indicadores concretos, abarcando aspectos como las emisiones por unidad de bien, la demanda energética para cada valor añadido, los incentivos fiscales por residuos, el capital ganado mediante el mejor uso de recursos o los retornos de inversiones verdes. Tal óptica evaluadora evidencia que las pautas de sostenibilidad fomenten ganancias económicas, potenciando sus alcances ambientales. Así, avanzar hacia la sostenibilidad bien se puede ver como un cambio intrínseco en los modelos de producción, y no solo como una norma impuesta.

La resiliencia socioambiental (RS) examina la aptitud de una colectividad para aguantar cambios y mantener sus quehaceres primordiales. Factores como la exposición al clima, las infraestructuras vitales a la mano, el nivel de las instituciones, el conocimiento que hay, estar listos para imprevistos y la gente involucrada deben ser tomados en cuenta. Dentro del mundo de los negocios, esta fortaleza se conecta igualmente con el vigor de las redes logísticas para reaccionar a percances ambientales. En las comarcas, puede abarcar la maña de los mandos y pobladores para prever peligros y retomar sus labores tras un suceso desafortunado.

Para edificar el IITS, cada faceta precisa ser convertida en un número comparable. Esto amerita elegir señalizadores, fijar medidas y llevar a cabo métodos de igualación. Una variable como emisiones de CO₂ por unidad producida puede presentar una escala completamente diferente a una variable como porcentaje de residuos reutilizados. La normalización permite convertir ambas en valores comparables dentro de una escala común. En términos metodológicos, pueden utilizarse procedimientos como la normalización min-max, puntuaciones estandarizadas u otras técnicas apropiadas según las características de los datos (Gudmundsson et al., 2015).

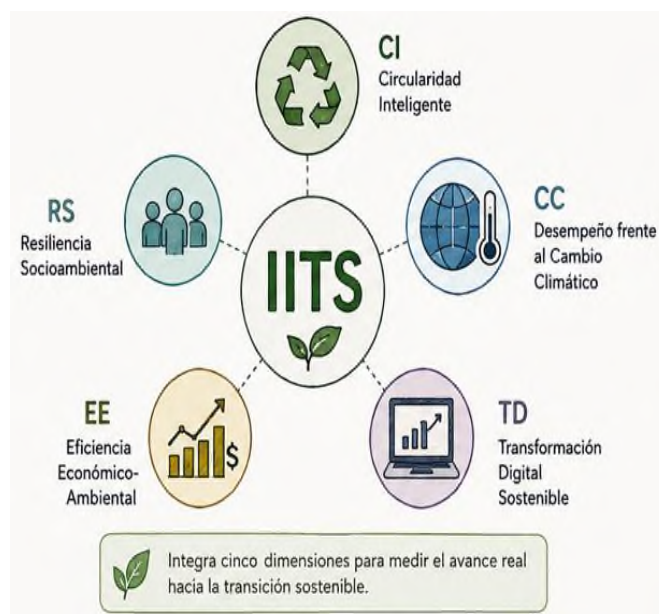
La ponderación constituye una elección crucial, puesto que establece el significado relativo de cada aspecto en el indicador. Quizás una formulación inicial otorgaría el mismo peso a CI, CC, TD, EE y RS, especialmente si la evidencia no es suficiente para favorecer algún componente en particular. De todos modos, ponderaciones desiguales podrían emplearse usando técnicas estadísticas, el consejo de expertos o sistemas de criterios múltiples. En un territorio con elevada exposición climática, por ejemplo, podría otorgarse mayor importancia al componente de resiliencia, mientras que en una industria intensiva en materiales podría priorizarse la circularidad.

Una representación matemática sencilla podría expresarse como $IITS = w_1CI + w_2CC + w_3TD + w_4EE + w_5RS$, donde cada w representa el peso asignado a una dimensión y la suma de todos los pesos debe ser igual a uno. Esta formulación permite obtener un valor agregado a partir de los cinco componentes. No obstante, la disección del índice requiere ser completada por el examen detallado de cada aspecto; una puntuación agregada espléndida pudiera esconder deficiencias notables dentro de uno de los rubros. El índice tiene que servir para consolidar datos, no para reemplazar la investigación completa.

De acuerdo con Gudynas (2003), el valor del IITS resplandece cuando se emplea para comparaciones a lo largo del tiempo y en diferentes lugares. Una compañía puede anotar su índice anualmente para averiguar si sus contribuciones están provocando un mejoramiento continuo. De la misma manera, muchas comunidades pueden ser comparadas usando un método consistente para señalar diferencias en circularidad, eficiencia climática, digitalización y fortaleza. La comparación a lo largo del tiempo también permite aclarar si un progreso es intrínseco o simplemente muestra circunstancias particulares de un periodo determinado. Esta habilidad le da al índice el papel de un instrumento de seguimiento del cambio.

El IITS se puede usar, al final, como una herramienta para guiar decisiones de inversión, planificación y dirección gubernamental. Un bajo índice de circularidad, ciertamente, podría insinuar la acuciante urgencia para perfeccionar los operativos flujos y las logísticas estructuras; una dudosa puntuación en el impacto ambiental, bien pudiera justificar partidas presupuestarias dirigidas a la mejora de la eficiencia energética o a la adaptación climática; además, una raquítica digitalización podría vislumbrar sendas para el ensamblaje de sistemas de monitoreo y predicción avanzados. La auténtica utilidad de este índice radica en la vinculación de sus conclusiones con determinaciones tangibles y en que su planteamiento metodológico demuestre transparencia, verificabilidad y flexibilidad conforme cambien los escenarios ambiental, económico y tecnológico.

Figura 5.1. Dimensiones del Índice de Integración y Transición Sostenible (IITS)



Elaboración: Autores

5.4. Construcción matemática del índice

La construcción matemática del Índice Integrado de Transición Sostenible demanda la metamorfosis de un cúmulo de variables ambientales, económicas, climáticas, digitales y sociales hacia una estructura cuantitativa sin fisuras. El reto medular radica en que estas variables se manifiestan en unidades dispares y ostentan vínculos de índole variada con la sostenibilidad. Por caso, una fracción más elevada de materiales reciclados se traduce en un desenlace beneficioso, al par que una mayor intensidad en las emisiones configura un desenlace adverso. Consecuentemente, previo al cálculo del índice, resulta imperativo establecer criterios uniformes que faculden la comparación y amalgama de los datos.

La primera etapa corresponde a la selección de indicadores. Estos deben representar adecuadamente las cinco dimensiones del IITS: Circularidad inteligente, desempeño frente al cambio climático, transformación digital sostenible, eficiencia económico-ambiental y resiliencia socioambiental. La selección debe considerar criterios de relevancia conceptual, disponibilidad de información, confiabilidad estadística, periodicidad y capacidad para representar cambios en el desempeño. Un número excesivo de indicadores puede generar redundancia, mientras que una cantidad insuficiente puede producir una representación incompleta del sistema.

De acuerdo con Gudmundsson et al. (2015), las métricas elegidas se podrán categorizar, para bien y para mal, considerando su nexo con el rendimiento sustentable. Con los indicadores positivos, la magnitud del índice se eleva si su valor avanza, por ejemplo, la fracción de desechos reciclados, la inclusión de energía renovable o el porcentaje de productos susceptibles de reparación. Sin embargo, los indicadores negativos muestran un vínculo opuesto, como las emisiones de CO₂ equivalentes, el uso de agua por cada unidad elaborada o la cantidad de basura no aprovechada. Tal distinción, sin lugar a dudas, es fundamental si queremos esquivar que la progresión de un factor nocivo se tome a mal como un progreso en el rendimiento.

Después que los indicadores son delimitados, la normalización deviene esencial. Este proceso comprende el cambio de variables medidas en toneladas, dólares, kilovatios-hora, por cientos y demás unidades a un solo alcance. Una estrategia buena, para esos indicadores que son positivos, es el empleo de normalización min-max: $N_i = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$. En cuanto a indicadores de naturaleza negativa, su uso con esta fórmula se plantea: $N_i = (X_{\max} - X_i) / (X_{\max} - X_{\min})$. Esto facilita la posterior ubicación de los resultados en un rango comprendido entre cero y uno, en el cual las puntuaciones que se aproximan a uno denotan un desempeño relativo superior.

La normalización también permite reducir el problema generado por las diferencias de magnitud entre indicadores. Una variable expresada en millones de dólares no debe tener automáticamente mayor influencia que otra expresada como porcentaje simplemente por utilizar valores numéricos superiores. Tras la normalización de los indicadores a un patrón homogéneo, la influencia que ejercerá cada métrica será determinada, posteriormente, por el peso que se le asigne. Resulta imperativo ejecutar semejante proceso de manera concertada a lo largo de todos los periodos examinados para precabar que oscilaciones en los puntos de referencia distorsionen ficticiamente la trayectoria del índice.

La siguiente etapa abraza el cómputo de la relevancia intrínseca de los indicadores. Los coeficientes subsiguientes a ello harán patente la importancia relativa que ostenta cada componente en el desenlace final. Una salida simple es la asignación de valores idénticos siempre y cuando la totalidad de las dimensiones se perciba con una jerarquía equiparable. Una perspectiva alternativa preconiza la asignación de valores divergentes valiéndose de consultoría especializada, procesos de índole numérica o esquemas de selección multifacética. La deliberación al respecto tendrá que sustentarse sobre el fundamento de

su metodología empleada, ya que retoques efectuados en los pesos pueden ocasionar modificaciones sustanciales en la colocación comparativa de entidades empresariales o áreas geográficas.

La conformación de un andamiaje jerárquico facilita enormemente el cálculo del índice. Primero, los indicadores singulares son compilados para lograr cada dimensión. Subsiguientemente, las cinco dimensiones se entrelazan para determinar el IITS. Ciertamente, cada dimensión podría articularse como $D_j = \sum w_i N_i$, en donde D_j significa la dimensión adscrita, w_i indica la ponderación del indicador y N_i , su valor estandarizado. El índice omnicomprendivo, entonces, puede formularse como $IITS = \sum W_j D_j$, dado que W_j representa la ponderación otorgada a cada una de las cinco dimensiones.

La agregación se puede ejecutar por vías lineales o geométricas; de tal suerte, dependerá del razonamiento inherente que desees conferir al índice. La agregación lineal da lugar a la compensación de un rendimiento escaso en una dimensión por medio de un desempeño magnífico en otra. Sin embargo, esta posibilidad puede resultar problemática cuando determinadas condiciones ambientales son consideradas límites que no deberían compensarse completamente. Una alternativa geométrica reduce la capacidad de compensación entre dimensiones y puede representar mejores situaciones en las que un desempeño muy deficiente en una dimensión afecta considerablemente al resultado global.

Los enfoques multicriterio pueden enriquecer la formulación de índices ante la concurrencia de objetivos y limitantes diversas. Metodologías como el análisis jerárquico, TOPSIS o variantes afines de la toma de decisiones multicriterio facilitan la evaluación de opciones mediante la consideración conjunta de una multiplicidad de criterios. Su utilización podría resultar particularmente ventajosa en la elección de proyectos de inversión, la adopción de tecnologías ambientales o la articulación de estrategias de transición. El beneficio primordial radica en su capacidad para integrar consideraciones económicas y ecológicas dentro de un marco de toma de decisiones unificado, eludiendo así que la ganancia financiera se erija en el único factor determinante de la viabilidad de una alternativa (Rodríguez et al., 2022).

El análisis de sensibilidad constituye una etapa necesaria para comprobar cuánto cambia el índice cuando se modifican determinados supuestos. Puede analizarse, por ejemplo, qué ocurre si el peso del desempeño climático aumenta o si se modifica la importancia de

la circularidad. Si pequeñas modificaciones generan grandes cambios en el resultado, el índice presenta una elevada sensibilidad a los parámetros utilizados. Por otro lado, si las relaciones entre los sitios no cambian demasiado, eso significa que el método es más fuerte. Esta manera de trabajar hace que sea más fácil decir qué cosas son las que tienen más impacto en los resultados.

La fuerza del indicador no solo depende de eso, sino también de qué tan buenos son los números y de que el método siempre es el mismo. Si falta un dato, si las estadísticas vienen de lugares diferentes o si las formas de contar cambian, eso puede cambiar lo que encontramos. Entonces, es crucial poner reglas para cuando no tenemos todos los datos, para saber cuándo un dato no encaja bien y para ver que los datos a lo largo del tiempo no se contradigan. La construcción del indicador debe permitir que diferentes investigadores u organizaciones puedan reproducir el cálculo utilizando los mismos datos y procedimientos.

La validación estadística representa la última etapa fundamental de la construcción matemática. Puede incluir análisis de correlación entre indicadores, pruebas de consistencia interna, análisis factorial, evaluación de sensibilidad y comparación con indicadores externos de desempeño ambiental o económico. La finalidad es comprobar que el índice representa razonablemente el fenómeno que pretende medir y que sus resultados no dependen exclusivamente de decisiones arbitrarias de diseño. Una vez validado, el IITS puede utilizarse para realizar comparaciones entre períodos, organizaciones o territorios, manteniendo una estructura cuantitativa transparente que facilite el seguimiento de los procesos de transición sostenible.

5.5. Matriz de madurez ambiental-digital

De acuerdo con Poveda y De Giusti (2024), la matriz de madurez ambiental-digital constituye una herramienta para clasificar el grado de transformación alcanzado por una organización o territorio en materia de sostenibilidad y digitalización. Su fin radica en ensanchar las métricas numéricas utilizando una visión diacrónica, lo cual posibilita desvelar variados estadios de gestación. La sazón del desempeño no emana únicamente del volumen de implementos técnicos desplegados, en su defecto, está arraigada en la aptitud para su utilización contextualizada en la mitigación de repercusiones ecológicas, la eficientización de los medios y la previsión de contingencias.

El Nivel 1 — Lineal: representa una estructura productiva caracterizada por el modelo tradicional de extracción, producción, consumo y disposición. En esta etapa, la preponderancia recae en el uso de recursos que están nuevos, la generación de desperdicios y la limitada reintegración de materiales. Las utilidades digitales suponen un apoyo casi nulo en la gestión ecológica y las decisiones muchas veces se adoptan luego de que las problemáticas ya afloraron. El desempeño ecológico es valorado de manera primordial, basándose en la acotación de obligaciones normativas, no necesariamente apuntando a un proyecto integral de sostenibilidad.

En esta etapa, los datos medioambientales se hallan, con frecuencia, desparrramados y la habilidad para monitorear de modo ordenado la ingesta de energía, agua, componentes y la producción de desechos se vislumbra reducida. Las asignaciones monetarias destinadas a aspectos ecológicos suelen enfocarse en remedios y no tanto en mutaciones de fondo. Mirándolo desde un ángulo monetario, la entidad podría verse muy vulnerable ante alzas en los valores de los insumos, erogaciones energéticas y desembolsos vinculados a la eliminación de desperdicios.

El Nivel 2 —Eficiente: consiste en implementar acciones pensadas para reducir la basura y usar al máximo los recursos disponibles. Las organizaciones comienzan a establecer indicadores que miden el gasto de energía, el consumo de agua, los materiales ocupados y los residuos producidos. Todo esto para gastar menos y hacer más. El menor consumo eléctrico, la reducción de pérdidas en los procesos y una mejor gestión de las materias primas caracterizan esta etapa. La digitalización comienza a utilizarse como mecanismo de control, aunque todavía no transforma completamente el modelo productivo.

En este nivel puede producirse una relación más directa entre gestión ambiental y desempeño económico. Reducir el consumo energético puede disminuir costos operativos, mientras que minimizar desperdicios puede mejorar la productividad material. Sin embargo, la lógica continúa siendo predominantemente de eficiencia, debido a que los procesos fundamentales de producción y consumo permanecen relativamente similares. La organización utiliza menos recursos para obtener un resultado determinado, pero todavía no necesariamente modifica la forma en que los productos son diseñados, utilizados y recuperados.

El Nivel 3, denominado Circular, ilustra una mutación sustancial orientada a la preservación y restauración del valor inherente de los materiales. Las entidades integran

metodologías de reacondicionamiento, remanufactura, reciclaje, además de la valorización de coproductos. Igualmente es factible imaginar simbiosis industriales, donde desechos u objetos sobrantes de una operación se vuelvan insumos para otra diferente. Por ello, la circularidad podía iniciar a infiltrar el diseño mismo de las operaciones, trascendiendo solo la disposición de sobrantes finales.

Ese paso exige rediseños en las cadenas de suministro, además de instalar las infraestructuras para reincorporar equipos y piezas luego de su vida útil. Genera, inclusive, nuevas configuraciones empresariales enfocadas en el arreglo, la segunda mano, la reconstrucción y la provisión de asistencias. Económicamente hablando, dichas tácticas tienen el potencial de atenuar la sujeción a insumos primigenios, originando oportunidades de beneficio con materiales antes descartados.

El Nivel 4 — Digital-circular: combina los principios de economía circular con herramientas digitales avanzadas. Tecnologías como Internet de las Cosas, inteligencia artificial, Blockchain, sensores y sistemas de trazabilidad permiten obtener información sobre el estado, ubicación, composición y utilización de productos y materiales. Con esta data se propician soluciones más precisas para la conservación, reparación, restauración y la reimpresión. La digitalización deja de ser simplemente una función administrativa; se transforma en una red infraestructural para guiar la circularidad.

En esta etapa, los datos están accesibles para anticipar inconvenientes, pronosticar el ciclo de vida de los artefactos y optimizar los traslados de materia. La rastreabilidad permite conocer el origen y constitución de ciertos acervos; al mismo tiempo, las metodologías predictivas podrán indicar cuándo algo necesita servicio de mantenimiento o si algunos compuestos se pueden recuperar. Esto permite reducir pérdidas de valor y mejorar la eficiencia de los procesos circulares. La utilización estratégica de tecnologías digitales puede, por tanto, incrementar la capacidad de gestión de sistemas productivos complejos.

El Nivel 5 — Regenerativo-inteligente: constituye el nivel de mayor madurez de la matriz. En esta etapa, la organización o territorio no se limita a reducir impactos, sino que desarrolla capacidades para anticipar riesgos, regenerar recursos y mantener la resiliencia de sus sistemas socioambientales. Los modelos predictivos, gemelos digitales, sistemas de alerta temprana y análisis de datos en tiempo real pueden integrarse en la planificación.

Las decisiones ambientales dejan de ser principalmente reactivas y adquieren un carácter preventivo y prospectivo.

La característica fundamental de este nivel es la integración entre circularidad, digitalización, mitigación climática y resiliencia. Los datos ambientales y económicos pueden alimentar sistemas capaces de identificar escenarios futuros y evaluar diferentes alternativas antes de realizar inversiones. La inteligencia artificial puede contribuir a optimizar recursos, mientras que los sistemas de monitoreo pueden detectar cambios ambientales y generar alertas. La tecnología, sin embargo, debe evaluarse considerando también su propio consumo energético y material para garantizar que la digitalización produzca beneficios ambientales netos (Senna et al., 2023).

La matriz puede utilizarse mediante un conjunto de criterios específicos para determinar el nivel de madurez de cada organización o territorio. Entre las cosas que se podrían tener en cuenta están la intensidad material, un posible porcentaje de residuos valorizados, la eficiencia en el uso de energía y la aplicación de tecnologías digitales; además, la capacidad de tener trazabilidad, el manejo de datos que se recogen, la disminución de emisiones, así como la capacidad para predecir eventos y la resiliencia frente a las inclemencias del clima. Para evaluar, podría ser que se asignaran puntajes a cada uno de esos criterios, estableciendo rangos que correspondieran a los cinco niveles definidos. En definitiva, de esta forma la matriz ha llegado a ser una herramienta práctica para descubrir las deficiencias y a su vez poder fijar las acciones que se requerían para ir mejorando en los niveles de transformación.

5.6. Matriz de decisión para empresas y territorios

La matriz de decisión, ese artilugio conceptual, se erige como un instrumento singular, un medio hábil para metamorfosear los hallazgos de la evaluación ambiental integrada en criterios específicos, rigurosos para la selección de aquellas alternativas que prometen. Si bien es cierto que los indicadores nos ofrecen una ventana al estado actual de una empresa o un territorio, desvelando su condición, la matriz, por su parte, asume la encomienda de dilucidar qué acciones, sin duda alguna, deberían materializarse, cuáles recursos ostentan la mayor prioridad, y en fin, qué inversiones prometen las perspectivas más auspiciosas desde un punto de vista tanto ambiental como económico. Su indudable utilidad reside intrínsecamente en su capacidad para amalgamar información de índole ambiental,

climática, tecnológica y, además, financiera, todo esto empaquetado, claro está, dentro de un único y cohesionado proceso de toma de decisiones.

En el ámbito empresarial, las decisiones relacionadas con sostenibilidad suelen involucrar diferentes alternativas de inversión. Una organización puede optar por modernizar maquinaria, incorporar energías renovables, implementar sistemas de inteligencia artificial, rediseñar productos o establecer sistemas de recuperación de materiales. Cada opción trae consigo distintos gastos, lapsos de recuperación y efectos en la ecología. La matriz será una herramienta para comparar estas posibilidades, usando criterios igualados, asegurando que la selección no dependa solamente del pago inicial.

La encrucijada decisiva, aquella de índole estratégica, se centra en la innovación que se usará. Al decantarse por un progreso tecnológico, resulta sumamente necesario evaluar la conveniencia de la solución para arreglar un problema particular, además de los requerimientos de funcionamiento. Consideremos un sistema IoT: su potencial para optimizar la monitorización del gasto energético y la identificación de fugas es considerable, mas no sin la necesidad de dispositivos de censado, una base de comunicaciones y un sostenimiento continuo. La alternativa más adecuada será aquella que presente una relación favorable entre inversión, desempeño ambiental, capacidad de integración y beneficios económicos esperados.

La segunda cuestión se relaciona con qué recurso priorizar. No todos los materiales fuente energética ni recursos hídricos tienen la misma trascendencia dentro de un entramado productivo. Una priorización efectiva pide ponderar criterios tales como la escasez intrínseca, el precio, su huella ecológica, la dependencia externa y la susceptibilidad ante alteraciones climáticas. Semejante examen permitirá la canalización de flujos financieros hacia aquellos componentes cuya optimización produzca dividendos económicos y ecológicos superlativos.

Además, la matriz puede discernir los procesos que merecen circuitizarse primero. Para ello pueden evaluarse variables como generación de residuos, cantidad de materiales recuperables, posibilidades de reutilización, costos de disposición y potencial de sustitución de materias primas vírgenes. Los procesos con mayores pérdidas materiales y mayor potencial de recuperación pueden recibir una prioridad superior. Esta metodología permite pasar de una política general de reciclaje hacia una estrategia selectiva de

circularidad basada en oportunidades concretas de generación de valor (Poveda y De Giusti, 2024).

La disminución de efluentes es un pilar con igual trascendencia. Sobre qué efluentes mermar, precisa valorar el volumen, la magnitud y el gasto para su reducción. Una empresa podría señalar procesos intensivos en energía, traslación con alta dependencia de combustibles fósiles, o fallos que exacerban los efluentes. La tabla comparativa permite diferenciar las alternativas de disminución según toneladas de CO₂ equivalentes evitadas, el capital requerido, y el tiempo de recuperación.

Con respecto a las regiones, la estructura fundamental tiene que integrar la perspectiva geográfica. Diferentes municipios y áreas geográficas podrían exhibir variados grados de susceptibilidad ante inundaciones, sequías, deslaves, calor extremo u otra clase de eventos. En tal sentido, la cuestión sobre cuáles peligros climáticos prever deberá ser abordada mediante el empleo de datos históricos, pronósticos climáticos e información de la superficie. Detectar puntos débiles y divisiones antes ayuda a enfocar los fondos en lo seguro, a avisar a tiempo y a adaptarnos.

El lado del dinero lo ponemos en costos, gastos diarios, ahorros esperados, tiempo de pago, valor actual neto y retorno sobre la inversión. Estas bases te ayudan a comparar proyectos ecológicos con distintas bolsas. Pero no pienses solo en lo que ganas ahora mismo; a veces, el dinero puesto da frutos verdes y para la gente es difícil ponerle un precio. El cuadro puede tener esto en cuenta con señales ecológicas extra o métodos para sumar varias cosas.

Un marco decisorio posibilita asignar cuantificaciones a cada alternativa, fundándose en criterios previamente establecidos. Por caso, una iniciativa podía ser evaluada partiendo de su contribución a la reducción de la polución del aire, al aprovechamiento de insumos, al fomento de una economía cíclica, al realce de la resiliencia, a la demostración de viabilidad monetaria y a su aptitud técnica. Además, a cada criterio podría otorgársele una relevancia acorde a los deseos del organismo o zona. El agregado total de las puntuaciones permitiría ordenar las alternativas, desde las que presentan mayor peso estratégico hasta las que su ejecución pudiera postergarse.

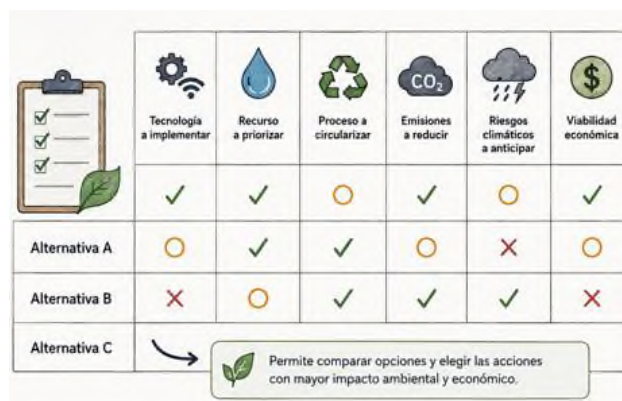
La matriz, su complemento, permite entradas originadas del Índice Integrado de Transición Sostenible IITS.

Cuando un ente demuestre un nivel bajo de circularidad, la discusión sobre tácticas tendrá, primordialmente, como objetivo apuntar a la recuperación de materiales, la reinstalación y la reestructuración de los procedimientos. Si el principal déficit corresponde al desempeño climático, las inversiones pueden orientarse hacia eficiencia energética, energías renovables y adaptación. De esta manera, el índice funciona como instrumento de diagnóstico y la matriz como mecanismo para transformar el diagnóstico en acciones (Poveda y De Giusti, 2024).

En los territorios, la aplicación puede extenderse a infraestructura pública, movilidad, gestión de residuos, agua, energía, planificación urbana y actividades productivas. Los oficiales deberían poder cotejar proyectos con fundamento en su afectación ambiental, valor dinerario, gente que es auxiliada, durabilidad y su aportación hacia las metas de desarrollo duradero. Otorgando la habilidad para fijar gradaciones de erogaciones gubernamentales; así, mediante una perspectiva polifacética, pueden ser priorizados particularmente en ocasión de limitación de fondos y concurrencia de requerimientos.

Al final, la matriz necesitará ser dinámica y se actualizará conforme mutan las condiciones económicas, tecnológicas y ambientales. Una alternativa que parece conveniente en un momento dado puede perder su atractivo ante mutaciones en precios energéticos, nuevas tecnologías, regulaciones ambientales o modificaciones en los riesgos climáticos. La incorporación periódica de datos nuevos permitirá recalcular las prioridades y mantendrá la toma de decisiones alineada con la evolución del sistema. Así, la matriz funcionará como un mecanismo continuo de priorización y no como una evaluación realizada solamente antes de la ejecución de un proyecto.

Figura 5.2. Matriz Comparativa para la Evaluación y Selección de Alternativas Sostenibles



	Tecnología a implementar	Recurso a priorizar	Proceso a circularizar	Emisiones a reducir	Riesgos climáticos a anticipar	Viabilidad económica
Alternativa A	✓	✓	○	✓	○	✓
Alternativa B	✗	○	✓	✓	✓	✗
Alternativa C	→					

Permite comparar opciones y elegir las acciones con mayor impacto ambiental y económico.

Elaboración: Autores

5.7. Escenarios de transición sostenible

De acuerdo con García-Olivares (2022), la construcción de escenarios de transición sostenible permite analizar diferentes trayectorias posibles de evolución de una empresa, territorio o sistema productivo frente a los desafíos ambientales, climáticos y tecnológicos. A diferencia de una proyección única, el enfoque por escenarios reconoce que el futuro depende de decisiones de inversión, cambios tecnológicos, políticas públicas, comportamiento de los consumidores y condiciones ambientales. Su utilidad radica en desentrañar las discrepancias potenciales en los resultados frente a diferentes combinaciones de enfoques y limitaciones.

El Escenario A, que representa la continuación de las tendencias, describe un camino en el que las organizaciones y las directivas actuales sufren solo modificaciones escasas. La expansión económica, el aprovechamiento de los insumos, la fabricación de desperdicios y la implementación de adelantos avanzan, en líneas generales, conforme a los rumbos antedichos. Este escenario funciona como referencia para comparar las consecuencias de implementar transformaciones adicionales. No necesariamente representa un escenario deseable, sino una línea base que permite determinar cuánto cambia el desempeño cuando se introducen nuevas estrategias.

Bajo un patrón de tendencia, los progresos ambientales, generalmente, se materializan a través de progresivas optimizaciones de eficiencia y estricta adherencia a normativas. Empero, la inflexibilidad de las actuales construcciones puede cimentar las uniones con

el carbón, petróleo y gas, recursos básicos antiquísimos y modos de elaborar cosas ya conocidos. Añadiendo a esto, los peligros del tiempo, intrínsecamente, podrían avivar los gastos de funcionamiento y trastornar las redes y las vías de provisión. Por ende, tal estado deja transparentes los desenlaces que se aguardan al acoger una táctica enfocada únicamente en modificaciones lentas.

El Escenario B, denominado transición circular, postula una reconfiguración sustancial de las dinámicas productivas y de consumo. Esto implica una diminuta dependencia de recursos vírgenes, concomitantemente con un augurio de la reutilización, restauración, remanufactura y regeneración de materiales. Las entidades empresariales tienen la facultad de concebir artículos para extender su operatividad temporal e instaurar esquemas de retorno. Simultáneamente, los dominios geográficos pueden erigir los andamiajes necesarios para la segregación, dignificación y utilización provechosa de desechos. La variable central es la capacidad de mantener materiales y productos dentro del sistema económico durante períodos más prolongados.

La economía circular puede alterar la dinámica corporativa al fomentar la simbiosis industrial. Lo que una empresa desecha, otra lo utiliza como materia prima; esto a la par disminuye los costos de desecho y la necesidad de recursos primarios. Este nuevo paradigma económico abre puertas a mercados alternativos, reparación y reutilización de materiales. No obstante, es imperativo contar con la infraestructura, la cooperación empresarial, mercados bien definidos y sistemas de seguimiento para asegurar la calidad y el abasto de los materiales recuperados.

El Escenario C, aquel enfocado en la transformación digital, canaliza sus esfuerzos para la integración de herramientas tecnológicas. La finalidad: potenciar la gestión y la eficiencia inherente a los sistemas productivos. La aplicación estratégica de sensores IoT, inteligencia artificial, análisis de macrodatos, automatización y el despliegue de plataformas digitales. Esto podría resultar en una amplificación de la habilidad para vigilar recursos y prever disfunciones. Los esquemas predictivos son capaces de emplear información ya existente y datos contemporáneos. Así, buscan una optimización de la energía, el agua, los materiales y los procedimientos de mantenimiento. La digitalización permite así aumentar la capacidad de respuesta y reducir determinadas ineficiencias.

No obstante, la transformación digital debe analizarse considerando sus propios requerimientos materiales y energéticos. El crecimiento de centros de datos, más dispositivos interconectados proliferando, las redes de telecomunicaciones expandiéndose y sistemas de inteligencia artificial desarrollándose a menudo llevan a más demanda eléctrica y un mayor uso de minerales críticos. Consecuentemente, el panorama digital bueno económicamente no siempre significa optimalidad ambiental. Esta evaluación cuidadosa necesitará considerar los beneficios que trae la tecnología, al igual que los problemas de su implementación.

Escenario D: el cambio climático en el mundo se enfoca en dos frentes principales: la disminución de emisiones contaminantes, por un lado, y por el otro el aumento de la resistencia. Las medidas sugeridas, por ejemplo, engloban usar la energía con mayor efectividad, cambiar las fuentes de combustible de alto contenido de carbono, aceptar la energía renovable, hacer eléctricas todas las operaciones y además construir infraestructura más fuerte. La aplicación de herramientas para controlar el riesgo climático, para planear el territorio y para tener pronósticos avanzados es también útil. La meta es disminuir la influencia en el cambio climático y la fragilidad ante sus efectos.

El contexto climático promete originar significativas metamorfosis económicas. Inversiones destinadas a tecnologías con baja emisión de carbono resultan promesas de nuevos nichos comerciales y fuentes de trabajo; empero, ciertas labores con alto consumo de fósiles podrían tropezar con cargas transicionales elevadas. Es así, entonces, que las corporaciones han de sopesar, por un lado, los peligros físicos intrínsecos al clima, y por el otro, los inherentes a modificaciones normativas, tecnológicas y de mercado. La elaboración estratégica a través de marcos prospectivos faculta la previsión de estas mutaciones, sorteando así diseños de inversión que fragüen una atadura a tecnologías con considerable vulnerabilidad ulterior.

El Escenario E: transición integrada circular-digital-climática combina simultáneamente las estrategias anteriores. En este caso, las tecnologías digitales funcionan como mecanismos para mejorar la circularidad y gestionar los riesgos climáticos. La inteligencia artificial puede optimizar flujos de materiales; los sensores pueden realizar seguimiento del consumo energético y de agua; la trazabilidad digital puede facilitar la recuperación de productos; y los modelos predictivos pueden anticipar riesgos

ambientales. El rasgo distintivo crucial de este contexto radica en la interdependencia de las tres transformaciones, apartándose de la perspectiva de entes aislados.

El examen de los diversos panoramas podría efectuarse utilizando métricas compartidas, por ejemplo, efluvios de CO₂ equivalentes, ingesta energética, empleo de materiales, producción de desechos, sustracción hídrica, erogaciones operativas, desembolso inicial, rendimiento y entereza. Cada escenario puede proyectarse para diferentes períodos y evaluarse mediante modelos económicos y ambientales. De esta manera, no se analiza solamente cuál escenario genera el mayor beneficio ambiental, sino también cuáles son sus costos, riesgos y requerimientos tecnológicos.

La evaluación prospectiva puede incorporar finalmente un escenario de transición sostenible que combine los elementos más efectivos de las diferentes alternativas de acuerdo con las condiciones específicas de cada organización o territorio. Los criterios que consideramos para elegir son: menos impactos indeseables, viabilidad económica, potencial tecnológico a futuro, la generación de empleos, nuestra fortaleza para anteponerse a crisis y la disponibilidad de lo necesario. Un análisis comparativo bien hecho permite descubrir propuestas robustas ante diferentes eventos por venir y así establecer un orden para la acción. Por ende, preparar prospectivas se convierte en un gadget apreciado para vislumbrar los resultados, bajar la incertidumbre y señalar la vía para la resolución de cambios que durarán mucho tiempo (Wesche y Hendriks, 2026).

5.8. Análisis costo-beneficio ambiental

La valoración económica de iniciativas de sostenibilidad, bajo un prisma de análisis costo-beneficio ambiental, dilucida si los provechos ambientales generados compensan adecuadamente los egresos monetarios inherentes a su puesta en marcha. En contraposición a una revisión puramente financiera, esta metodología integra externalidades ambientales a menudo soslayadas por la dinámica mercantil. Por consiguiente, una erogación pecuniaria es factible de ser dimensionada sopesando conjuntamente su viabilidad económica, la atenuación de secuelas negativas, el uso optimizado de recursos y el fomento de la adaptabilidad sistémica.

La inversión inicial exige una determinación minuciosa de los componentes esenciales. Esto incluye la adquisición de equipo optimizado, la infraestructura para la valorización de recursos, la implementación de sistemas de tratamiento avanzados, la integración de

energías renovables, la adopción de sensores específicos, el diseño de plataformas digitales y tecnologías de supervisión de alta gama. Además, deben considerarse los gastos vinculados a la formación del personal, el ajuste de metodologías operativas, el montaje físico y la validación de los sistemas. Un inventario exhaustivo de estos egresos previene una apreciación deficiente del capital requerido para desplegar una estrategia de transformación.

Los costos no necesariamente se concentran en el momento inicial. Algunas soluciones requieren gastos recurrentes relacionados con mantenimiento, actualización tecnológica, consumo energético, gestión de datos o reposición de equipos. Con respecto a las tecnologías digitales, por decir algo, aparte de la compra del equipo físico, surgen gastos vinculados a los programas informáticos, la guarda de datos, el enlace y la protección electrónica. De esta forma, la ponderación resulta ser un examen del coste total a lo largo de la existencia del camino a seguir y no solo el monto de compra (O'Mahony, 2021).

Los beneficios económicos primordiales incluyen el ahorro de recursos. Una disminución en el uso de energía, agua o materias primas es capaz de reducir los gastos operativos y potenciar la productividad. La reutilización de materiales podría mitigar la dependencia de la adquisición de insumos vírgenes, mientras que el mantenimiento predictivo sería vital para acortar las pérdidas provocadas por fallas no pronosticadas. Estos beneficios económicos tan significativos resultan posibles de cuantificar cotejando el escenario donde se implementa la intervención con una circunstancia base, de no haber inversión alguna.

La reducción de emisiones constituye otro beneficio relevante. Para incorporarla al análisis económico, puede estimarse la cantidad de CO₂ equivalente evitada como consecuencia de una determinada inversión. Posteriormente, este resultado puede relacionarse con un valor económico del carbono o con los costos que la organización debería asumir para cumplir futuras regulaciones climáticas. La valorización permite el cotejo de proyectos con diferentes niveles de inversión y habilidades variadas a fin de reducir emisiones.

El desperdicio más bajo puede acarrear ganancias monetarias, tanto directas como indirectas. Cantidades menores de desecho se traducen, frecuentemente, en gastos rebajados por concepto de recolección, transporte, procesamiento y disposición. Si los desechos se transforman en productos vendibles o materiales para reciclar, un flujo

monetario adicional sería posible. El escrutinio debe contemplar los costos que se evitan, así como el importe que representan los materiales recuperados, desistiendo de la suposición de que todos los residuos son un costo sin ningún tipo de provecho.

La evaluación detallará cómo el retorno de inversión, ese índice crucial conocido como ROI, arrojará luz sobre la relación intrínseca entre las recompensas monetarias conseguidas y la suma de capital destinada a la iniciativa. Una manera fundamental de plantearlo es con la fórmula ROI, donde los beneficios netos, tras restar todos los costos, se reparten entre el desembolso inicial, y luego se multiplican por cien. Dicho indicador simplifica el cotejo entre distintas opciones; sin embargo, su aplicación no debiera ser exclusiva. Un proyecto, hipotéticamente, podría exhibir un rendimiento financiero no sobresaliente y, paralelamente, propiciar aminoramientos sustanciales de emisiones o amplificar de forma notable la robustez de una infraestructura (O'Mahony, 2021).

El período de recuperación permite determinar cuánto tiempo se necesita para recuperar la inversión mediante los ahorros e ingresos generados. Esta circunstancia se hace sobremanera crucial para empresas que lidian con apuros de caja o para proyectos novedosos que implican desembolsos iniciales fuertes. Sin embargo, la dedicación única a plazos de retorno cortos podría fomentar empresas con ganancias rápidas y descuidar inversiones estratégicas que traen rendimientos ambientales y económicos a largo plazo.

Determinar en dinero los impactos ambientales representa un obstáculo metodológico de consideración. Ciertas consecuencias, véase la eficiencia energética, pueden valorarse de manera directa usando cotizaciones bursátiles. Distinto es el caso de la mitigación de perjuicios ecosistémicos, el realce de la salubridad del entorno o la aminoración de ciertos peligros climáticos, que implican el uso de herramientas de evaluación ambiental. Estas metodologías posibilitan la cuantificación económica de ventajas inobservables en el mercado, si bien su apreciación demanda un análisis crítico de los presupuestos subyacentes.

En las iniciativas territoriales, el escrutinio podría abrazar ventajas vinculadas a la mitigación de estragos climáticos, un descenso en los gastos de salud pública, la optimización de la infraestructura y la salvaguarda de los ecosistemas. Invertir en mecanismos de notificación precoz, por poner un caso, quizá no produzca un rédito manifiesto, empero puede mermar las menguas económicas producidas por anegamientos

o corrimientos de tierra. De esta forma, la carga financiera de la medida ha de ponderarse frente a las mermas potenciales esquivadas y las ventajas colectivas ligadas a un más alto potencial de réplica.

Según el estudio de Gómez (1994), mejorar el análisis costo-beneficio posible sería incorporando evaluación multicriterio particularmente en esos escenarios donde los beneficios sean complicados de expresar numéricamente. Para ello y además de las medidas económicas, se pueden añadir otros aspectos tales como la reducción de emisiones, la generación de empleo, la promoción de lo circular, el aumento de la resiliencia, el progreso tecnológico y la obtención de ventajas sociales. Esta manera de ver las cosas en conjunto, evita que proyectos con impactos ambientales significativos queden fuera por el mero hecho de que calcular sus beneficios directos en dinero sea un lío.

Considerando los factores a largo plazo, la evaluación deberá integrar la incertidumbre propia de los precios, tasas de interés, los gastos tecnológicos, las normativas ambientales y los imprevistos climáticos venideros. Al ponderar escenarios y sensibilidades, es posible revelar de qué manera la viabilidad económica de un proyecto se modifica cuando estos factores varían. Proyectos que permanecen rentables ante múltiples escenarios reflejan una resiliencia mayor para la toma de decisiones. Paralelamente, el análisis de costo-beneficio ambiental permite seleccionar opciones que no solo sean viables económicamente, sino que además mitiguen impactos negativos, salvaguarden bienes y refuercen la capacidad de adaptación a cambios futuros.

5.9. Gobernanza para la transición sostenible

La gobernanza para la transición sostenible engloba el conjunto de instituciones, actores, normas, mecanismos de coordinación y procesos de toma de decisiones que facultan para orientar una economía hacia modelos productivos ambientalmente responsables. Radica su importancia en que los problemas vinculados al cambio climático, la pérdida de recursos y la transformación tecnológica no tienen solución por un solo sector. Estas circunstancias demandan coordinación entre entidades públicas, empresas, instituciones académicas, organizaciones sociales y actores financieros.

La esfera gubernamental ejerce una actividad fundamental; articula políticas públicas, establece regulaciones, instrumenta incentivos económicos y erige sistemas de

información ambiental. Los entes de autoridad pública facultan el establecimiento de parámetros de eficiencia energética, la administración de residuos, la contención de emisiones y la óptima utilización de recursos, sin obviar el fomento de capital en tecnologías de carácter sostenible. Aunado a lo anterior, la planificación estatal propicia la definición de metas a largo plazo y la armonización de esfuerzos intergubernamentales, eludiendo así la compartimentalización de las políticas enfocadas en el medio ambiente.

Según Zelada et al. (2026), el ejercicio gubernamental adopta importancia singular ante externalidades ambientales que los mercados incapazmente internalizan en el valor. Herramientas como impuestos al medio ambiente, esquemas de intercambio de emisiones, auxilios financieros, desgravaciones fiscales y modos de adquisición públicos pueden alterar los impulsos económicos tanto de corporaciones como de particulares. La conjunción de directivas y recursos de mercado posibilita canalizar determinaciones privadas en dirección a opciones que mitiguen los sobre costos ambientales y sociales enlazados a las faenas de producción.

Las corporaciones representan un pilar esencial adicional. Estas agrupan un considerable volumen de determinaciones vinculadas a la manufactura, la asignación de capital, el desarrollo inventivo y el despliegue de patrimonios. La metamorfosis hacia la sustentabilidad exige, de forma perentoria, que las entidades integren preceptos ecológicos dentro de sus directrices empresariales y marcos operativos. Una implicación de esto es el análisis pormenorizado de la totalidad de la vida útil de los bienes, la fijación de metas concretas para menguar emisiones, la optimización de la productividad en términos de materiales y energía, y la adopción de herramientas tecnológicas que faciliten el seguimiento del rendimiento ecológico.

La implicación del ámbito financiero resulta igualmente propicia para alterar los esquemas de inversión. Las entidades bancarias, vehículos de inversión colectiva, así como los demás organismos financieros, son capaces de integrar consideraciones de índole ambiental, social y de gobernanza al examinar propuestas empresariales y proyectos. La disponibilidad de capital podrá fomentar direccionalidad hacia la optimización energética, los modelos circulares, las infraestructuras adaptables y los avances tecnológicos inocuos. Simultáneamente, una apreciación rigurosa de los peligros medioambientales autoriza la detección de aquellos valores cuyo rendimiento prospectivo

podría verse comprometido por mutaciones normativas o físicas vinculadas a la alteración climática.

El ámbito académico suministra acervo científico, protocolos de escrutinio y destrezas para escudriñar las repercusiones económicas y ecológicas inherentes a las vías de transformación. Instituciones de estudios superiores y observatorios de investigación están capacitados para fraguar índices, diagramas prospectivos y esquemas de valoración, lo cual permite aminorar la duda al momento de arbitrar determinaciones. La indagación de índole transdisciplinaria adquiere preponderancia mayúscula, en virtud de que las adversidades medioambientales entrelazan de consuno variables monetarias, tecnológicas, ecológicas y sociológicas (Zelada et al., 2026).

La sociedad participa mediante sus decisiones de consumo, procesos de participación ciudadana y mecanismos de control social. Los patrones de demanda pueden incentivar productos reparables, reutilizables, duraderos y con menor impacto ambiental. Asimismo, la participación ciudadana en procesos de planificación territorial puede incorporar conocimientos locales y permitir identificar riesgos que no siempre aparecen en los registros administrativos. Por ende, la gobernanza sustentable amerita disposiciones que hagan posible la implicación ciudadana en las determinaciones concernientes a su hábitat.

Las configuraciones innovadoras posibilitan entrelazar corporaciones, instituciones de saber, el Estado, organizaciones no lucrativas y germinaciones tecnológicas. En esos contextos, podían surgir proyectos piloto, laboratorios de innovación, plataformas de datos y soluciones dirigidas a retos ambientales específicos. La colaboración entre los participantes fomenta el intercambio de infraestructura, conocimiento y destrezas técnicas, de tal modo que se reducen las barreras que enfrentan las entidades individuales al desarrollar tecnologías sostenibles.

La gobernanza de datos ambientales, una faceta cada vez más vital, emerge como una necesidad apremiante ante la proliferación de sensores, plataformas digitales, sistemas de monitoreo sofisticados y el incesante avance de la inteligencia artificial. La información esencial para el análisis de los recursos naturales, la cuantificación de emisiones, la caracterización de riesgos climáticos o la gestión de residuos tiene que haber reunido las condiciones apropiadas de calidad, de trazabilidad inherente, de seguridad sólida e interoperabilidad adaptable. La mera presencia de datos dispersos, desorganizados o intrínsecamente incompatibles tiende a coartar significativamente la facultad de las

instituciones encargadas de edificar diagnósticos fidedignos y orquestar políticas ambientales de manera coherente y efectiva.

La interoperabilidad empodera entidades variadas para intercambiar información, usando estructuras y estándares compatibles. Si pensamos en una región particular, los detalles de uso de energía, pureza del aire, formas de moverse, cuántos desechos se generan y cómo es el clima provienen de muchas partes. Juntar estos datos tan distintos permite construir sistemas de información más completos, lo que ayuda mucho a entender las conexiones entre lo ambiental y lo económico. Para ello se requieren protocolos de intercambio, criterios comunes de medición y responsabilidades claramente definidas sobre la gestión de los datos (Loorbach, 2009).

La divulgación pública y la responsabilidad inherentes constituyen pilares cruciales para calibrar el alcance de las metas de transición. Entidades gubernamentales como privadas tienen la obligación de suministrar datos comprobables referentes a sus efluvios, el gasto de patrimonio, el capital destinado a lo ecológico y los logros cosechados. El acceso a datos promueve la fiscalización de las promesas y posibilita contrastar la actuación a través de lapsos temporales o actores diversos. Adicionalmente, la transparencia minimiza la probabilidad de que las tácticas ambientales se restrinjan a meras proclamaciones carentes de anclaje con realidades mensurables.

La gobernanza también debe incorporar mecanismos de coordinación y evaluación permanente. Las políticas ambientales pueden producir efectos diferentes entre sectores y territorios, mientras que una decisión tecnológica puede generar beneficios en una dimensión y costos en otra. Por ello, los procesos de gobernanza deben apoyarse en sistemas de indicadores, evaluación de escenarios y mecanismos de retroalimentación. Esta estructura permite modificar políticas e inversiones cuando los resultados obtenidos se alejan de los objetivos establecidos.

Figura 5.3. *Pilares para la Gobernanza de Datos en la Gestión Ambiental*



Elaboración: Autores

5.10. Aplicación territorial del modelo

La concreción geográfica del modelo de evaluación ambiental integrada facilita la trans migración de los principios de circularidad, acción climática, digitalización y resiliencia desde el plano teórico a emplazamientos geográficos particulares. Un territorio puede ser comprendido como una red interconectada donde coexisten actividades económicas, estructuras físicas, demografía, nichos ecológicos, organismos y flujos de materias primas. Esta visión permite discernir la forma en que las determinaciones de índole económica y tecnológica alteran de manera conjunta tanto el rendimiento ambiental como el estado social.

En el ámbito de las organizaciones manufactureras, la utilización de este modelo se presenta para mensurar la ingesta de materiales crudos, potencia y líquido H₂O, así como también la producción de desechos y efluvios. Integrar sensores, mecanismos de vigilancia y entendimiento artificial posibilita capturar datos relativos a los ciclos productivos y discernir menguas de efectividad. Con fundamento en esta data recopilada, se vuelven evidentes las posibilidades de reemplazo, rescate de elementos, alistamiento predictivo y aminoración del gasto de fuerza. La valoración, en una etapa subsecuente, podría ser unificada con parámetros financieros a fin de definir la factibilidad de los caminos alternos.

Los municipios integran una esfera de actividad suplementaria porque tienen encomendada la provisión de servicios esenciales, la ordenación territorial, la gestión de

desechos, el desplazamiento de personas y ciertos grupos de redes de soporte vital. El modelo presentado permite señalar zonas que sufren una intensidad ecológica superior y establecer la prelación para la distribución de recursos. La acumulación de datos sobre la producción de desechos, la ingesta hídrica, las emisiones contaminantes, la movilización ciudadana y las contingencias meteorológicas se puede unificar con el fin de dirigir la acción gubernamental. La digitalización permite además mejorar el monitoreo de los servicios y generar información para una gestión territorial más precisa (Loorbach, 2009).

En el ámbito urbano, la implementación de tal aplicación podría adoptar una perspectiva sistémica inherente a la masificación demográfica, las dinámicas económicas, el entramado de infraestructuras y la demanda de recursos. Los sistemas avanzados, en su naturaleza, son capaces de aprovechar información obtenida de una diversidad de fuentes, incluyendo sensores desplegados, la infraestructura de movilidad, observatorios climáticos, redes de suministro energético y las diversas prestaciones ofrecidas por las administraciones locales. Tal caudal de información tiene el potencial de ser canalizado hacia la optimización de la circulación vial, la minimización del gasto de recursos, la detección de áreas de particular fragilidad y la mejora sustancial en la administración de los desechos. Asimismo, los procesos de planeación citadina podrían integrarse con simulaciones y proyecciones dirigidas a ponderar las repercusiones ecológicas asociadas a distintas trayectorias de desarrollo.

Parques industriales presentan excepcionales oportunidades para la implementación de conceptos de simbiosis industrial. Firmas ubicadas dentro de una demarcación geográfica común tienen posibilidad de compartir recursos, ya sean materiales, energía, agua o efluentes que antes se concebían como desechos. Un análisis de la zona geográfica nos sirve para detectar afinidades entre las entradas y las salidas de diversas empresas. Si estas interacciones demuestran ser financieramente factibles, redes de colaboración podrán ser establecidas, disminuyendo el gasto en eliminación y el uso de recursos primarios.

Las entidades educativas hallan en este modelo un terreno fértil para la experimentación y la gestación de saber. Universidades, institutos y centros formativos cuentan con la posibilidad de discernir su gasto energético, la procedencia de sus desechos, sus patrones de desplazamiento, el uso hídrico y la eficiencia de sus instalaciones. Al integrar sistemas de vigilancia se produce un caudal de datos que puede servir, a la vez, para la administración de la institución y para el desarrollo de iniciativas académicas. Así se

impulsa la concepción de laboratorios vivientes donde las estrategias medioambientales encuentran un campo de pruebas efectivo bajo circunstancias genuinas.

En las cadenas de suministro, el modelo posibilita extender la evaluación rebasando las fronteras físicas de una organización. Una compañía puede demostrar un rendimiento ambiental ventajoso dentro de sus operaciones; no obstante, puede confiar en proveedores que exhiben altos niveles de emisiones o emplear insumos cuya procedencia acarrea secuelas notables. La rastreabilidad digital posibilita monitorear productos y materias primas a lo largo de distintas fases. Dicha información autoriza la localización de focos críticos y la formulación de tácticas para menguar las repercusiones en la totalidad de la cadena.

La aplicación territorial también resulta relevante para los sectores estratégicos, como energía, agricultura, transporte, manufactura, construcción, minería y gestión del agua. Cada sector presenta diferentes estructuras de consumo de recursos y exposición a riesgos ambientales. Por ejemplo, la agricultura puede priorizar eficiencia hídrica y adaptación climática, mientras que la industria puede concentrarse en eficiencia material, energía y circularidad. La metodología debe conservar una estructura común, pero permitir indicadores específicos según las características de cada actividad.

De acuerdo con Zelada et al. (2026), los sistemas de información geográfica y las tecnologías de observación territorial pueden fortalecer considerablemente la aplicación del modelo. Los datos satelitales, mapas de cobertura del suelo, información climática y registros socioeconómicos permiten localizar espacialmente los principales riesgos y presiones ambientales. La integración de estas fuentes facilita identificar áreas con mayor vulnerabilidad y establecer prioridades de intervención. También permite analizar cómo se distribuyen espacialmente los beneficios y costos asociados con diferentes estrategias de transición.

La evaluación territorial debe incorporar además las diferencias socioeconómicas existentes dentro de un mismo espacio. Regiones pares muestran apariencias de agobio por el entorno, pero tienen facultades marcadamente distintas para confrontar adversidades climáticas o financieras. Diversos factores, como ingresos, servicios, accesibilidad, infraestructuras, ocupación, formación y aptitud institucionales, Considerar esos factores extrínsecos además de la simple ecología puede beneficiar el juicio. Tal

enfoque no permitiría que la renovación sustentable fuera juzgada únicamente por sus logros ambientales, y haría más factible sopesar sus ramificaciones distribucionales.

Este modelo provee una herramienta valiosa para la edificación de cartografías regionales del desempeño sostenible; en esto, se asignan puntuaciones concretas a las esferas de circularidad, impacto climático, avance digital, eficacia operativa y robustez territorial. Tales hallazgos, sin duda, se expresan por medio de escalafones de rendimiento que facilitan la delimitación de las regiones con demandas más acuciantes de mejora. La confrontación entre diferentes áreas posibilita la canalización estratégica de fondos públicos y privados hacia aquellas geografías donde la inversión tiene la capacidad de acarrear dividendos ambientales y sociales más significativos. Sumado a lo expuesto, las evaluaciones periódicas permiten averiguar si las normativas estatales logran una alteración observable en la trayectoria de los eventos geográficos.

Dentro del dominio de la planificación, la implementación en el terreno posibilita entremezclar los resultados de la evaluación junto con planes de transformación. Una municipalidad puede comparar, por ejemplo, las consecuencias de mantener el rumbo actual versus alternativas fundadas en la economía circular, la digitalización, el ajuste climático o la conjunción de estas políticas. La configuración de escenarios puede incluir factores económicos, ecológicos, tecnológicos y socioculturales con la finalidad de proyectar sus potenciales resultados. Este procedimiento ofrece una plataforma medible para la priorización de desembolsos, la delimitación de metas regionales y la adaptación de directrices a medida que el contexto evoluciona.

5.11. Hacia una nueva economía ambiental predictiva

La economía ambiental predictiva, de hecho, significa una progresión más allá de las estrategias de administración que históricamente se han basado fuertemente en datos pasados, impulsándonos hacia esquemas capaces de anticipar mutaciones y peligros venideros. El auge de su concepción, ciertamente, está intrínsecamente vinculado a la abundante acumulación de información ambiental, de índole económica, climática y tecnológica, sin olvidar las innovaciones notables en inteligencia artificial y metodologías de modelado. Entonces, en tal escenario, los datos previamente confinados a la descripción de tendencias pretéritas comienzan a metamorfosearse, asumiendo un rol

fundamentalmente estratégico, destinado a guiar las resoluciones antes de que las repercusiones concretas se manifiesten.

La mudanza de un enfoque de diagnosticar a prever requiere una transformación en el modo en que compañías y zonas abordan sus retos ambientales. Mediante un diagnóstico corriente se puede averiguar cuánto se consume, cuánta polución hay o cuánta basura se genera en un periodo ya establecido. Un sistema de predicción, por otro lado, usa estos datos para ver cómo andarán las cosas en el futuro con diferentes posibilidades. Esto permite encontrar problemas rápido y planear cómo actuar antes de que las cosas se pongan muy graves.

El virar desde la respuesta reactiva hacia la previsión se perfila como un requisito ineludible frente a riesgos ambientales que podrían causar considerables mermas económicas. El modelaje predictivo, haciendo uso de datos climáticos, de producción y de ubicación, facilita prever acontecimientos tales como la falta de agua, el incremento de vertidos, la acumulación anómala de residuos o la interrupción de las cadenas de suministro. Consecuentemente, los organismos logran adecuar sus modos de funcionamiento, redistribuir recursos o activar planes de contingencia. La prevención puede reducir tanto los costos económicos como la magnitud de los daños ambientales.

El traspaso desde la eficiencia hasta la regeneración exigirá que se amplíe la órbita de las directrices medioambientales. Por su parte, la eficiencia aspira a alcanzar una meta de producción con un menor uso de energía, agua o materiales. Aunque este camino posibilita la reducción de costes y la presión sobre la ecología, no garantizaría de manera intrínseca la mejora de los ecosistemas afectados. Una perspectiva de regeneración, al revés, contempla objetivos enlazados con la recuperación del medio ambiente, la recuperación de recursos, la salvaguardia de la biodiversidad y la elevación de las funciones de los ecosistemas.

La economía ambiental predictiva halla el empleo de tecnologías de inteligencia artificial con el propósito de descifrar complejas interrelaciones entre las variables. Algoritmos de aprendizaje automático logran el procesamiento de volúmenes considerables de datos que provienen de sensores, satélites, historiales empresariales y acervos climáticos. Partiendo de estas informaciones, se podrán concebir modelos idóneos para estimar futuras coyunturas y descubrir pautas que presentarían un desafío para la identificación por medio de análisis rutinarios. La eficacia de estos instrumentos descansa, no obstante, sobre la

calidad, idoneidad representativa y el nivel de actualidad de la información empleada (Gudynas, 2003).

La transición de indicadores desvinculados a conjuntos inteligentes exige la cohesión de variadas dimensiones en una única infraestructura de información. Específicamente, las liberaciones, el decaimiento energético, el empleo de recursos, la creación de desechos, las salidas de dinero, y las condiciones del tiempo se someten a un examen conjunto. Esta organización posibilita desvelar vínculos entre aspectos habitualmente valorados por separado. Una bajada en las liberaciones, por ejemplo, podría examinarse simultáneamente respecto a su importe monetario, su repercusión en el gasto de energía y sus efectos en el uso de materiales.

Los sistemas de inteligencia artificial tienen la capacidad de asimilar datos que fluyen en tiempo real; de esta manera, sus pronósticos son de continuo perfeccionamiento. La información recopilada a través de sensores emplazados en emplazamientos industriales, redes energéticas, sistemas acuíferos y la urbe misma aporta un conocimiento detallado de la coyuntura de los sistemas. La conjunción de estos datos actuales con registros pasados y proyecciones nos permite discernir diferencias respecto a los patrones esperados. Un proceso de actualización constante posibilita que las determinaciones adoptadas guarden armonía con las fluctuaciones del entorno ecológico y del panorama económico.

La dimensión económica reviste importancia significativa, ya que la transición sostenible exige la asignación de recursos limitados a través de diversas opciones. Los modelos predictivos tienen la capacidad de pronosticar los gastos venideros de estrategias concretas, a la par que las economías resultantes de una eficiencia optimizada o del recobro de materiales. Igualmente, pueden albergar peligros asociados con las cotizaciones energéticas, el abasto de insumos primarios, las normativas ecológicas y contingencias climáticas. Tal capacidad faculta la evaluación de la sostenibilidad bajo la premisa de una interconexión inherente entre el manejo ecológico, el rendimiento productivo y el vigor competitivo.

El concepto de desarrollo sostenible anticipatorio implica que las decisiones actuales deben evaluarse considerando sus posibles consecuencias futuras. Una infraestructura, tecnología o modelo productivo puede presentar resultados favorables en el corto plazo,

pero generar dependencias ambientales o económicas difíciles de modificar posteriormente. Los escenarios prospectivos permiten identificar estas situaciones antes de realizar inversiones de largo plazo. La anticipación adquiere así una función preventiva frente a riesgos tecnológicos, climáticos y de disponibilidad de recursos.

De acuerdo con Montero (2023), la nueva economía ambiental también requiere fortalecer la capacidad institucional para interpretar información predictiva. Contar con modelos avanzados no garantiza por sí solo resultados optimizados. Las organizaciones requieren personas capacitadas, lineamientos de examen, arquitecturas para el manejo de datos y procesos que puedan transformar las predicciones en acciones concretas. Además, las estructuras deben incorporar mecanismos de evaluación para facilitar la identificación de errores, el ajuste de parámetros y la verificación de si las proyecciones efectivamente promueven una gestión ambiental mejorada.

Implementar modelos pronósticos exigirá tomar en cuenta también los límites y los riesgos inherentes a la digitalización. Es fundamental recordar que los centros de datos, los sistemas de inteligencia artificial, los dispositivos conectados y las redes digitales, en su conjunto, demandan energía, requieren infraestructura y consumen materiales. Por esta razón, una economía ambiental predictiva no debería limitarse a tan solo evaluar los provechos que provienen del uso de las tecnologías digitales. Sin embargo, también tendrá que calcular sus emisiones, su consumo energético, la producción de desechos electrónicos generados y su dependencia de minerales críticos, integrando a través de estas variables la valoración de su desempeño ambiental.

Integrar la economía circular, la acción climática y la transformación digital facilita crear sistemas que predigan las demandas de recursos, mejora los flujos de materiales, disminuye las emisiones y fortalece la resiliencia. Desde esta perspectiva, los datos ambientales y económicos alimentan indicadores junto a modelos prospectivos, permitiendo la comparación entre diferentes trayectorias de crecimiento. La planificación deja de basarse solo en solucionar problemas tras que ocurren y dirige su camino hacia decisiones informadas por datos, escenarios y un análisis constante de los resultados económicos y ambientales.

BIBLIOGRAFÍA

- Akyapi, B. (2023). Machine learning and feature selection: Applications in economics and climate change. *Environmental Data Science*, 2. <https://doi.org/10.1017/eds.2023.36>
- Aldrees, A., Javed, M. F., Taha, A. T. B., Mohamed, A. M., Jasiński, M., & Gono, M. (2023). Evolutionary and ensemble machine learning predictive models for evaluation of water quality. *Journal Of Hydrology Regional Studies*, 46, 101331. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101331>
- Alvear-Puertas, V., Rosero-Montalvo, P., Peluffo-Ordóñez, D., & Pijal-Rojas, J. (2017). Internet de las cosas y visión artificial, funcionamiento y aplicaciones: revisión de literatura. *Enfoque UTE*, 8(1), 244-256. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v8n1.121>
- Ávalos, M. B. B., & Avalos, S. P. B. (2016). Metodología para crear un sistema integrado de gestión de calidad ambiental para la zona natural diferenciada ecuatoriana andina. *DELOS Desarrollo Local Sostenible*, 9(26), 6. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6496157>
- Bagum, J., Sahoo, S., Samanta, A., Nalluri, A., Sana, S. S., Bhardwaj, P., Ramesh, K., Raghavan, V., Garg, A. P., & Choudhury, M. (2024). Introduction to Environmental Waste. En *Introduction to Environmental Waste* (pp. 1-25). <https://doi.org/10.1201/9781003258377-1>
- Barrio, A. (2018). *Internet de las cosas*. Editorial Reus.
- Basabe, A. A. (2026). *El pasaporte digital de producto como herramienta para potenciar la circularidad y la transparencia en la contratación pública de edificios e infraestructuras*. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10569338>
- Bernat, P. (2025). Pasaporte Digital de Producto para el Sector Jamonero basado en Blockchain e IoT. En *Archivo Digital UPM (Universidad Politécnica de Madrid)*. <https://oa.upm.es/91772/>

- Bhatia, M., Meenakshi, N., Kaur, P., & Dhir, A. (2024). Digital technologies and carbon neutrality goals: An in-depth investigation of drivers, barriers, and risk mitigation strategies. *Journal Of Cleaner Production*, 451, 141946. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141946>
- Bocken, N. M. P., De Pauw, I., Bakker, C., & Van Der Grinten, B. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal Of Industrial And Production Engineering*, 33(5), 308-320. <https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124>
- Carpio, W. T. M., Pincay, R. B. M., & Piguave, W. G. V. (2022). Economía circular como estrategias para el desarrollo sostenible en Ecuador. *RECIAMUC*, 6(3), 635-645. [https://doi.org/10.26820/reciamuc/6.\(3\).julio.2022.635-645](https://doi.org/10.26820/reciamuc/6.(3).julio.2022.635-645)
- Carvajal-Benavides, J. G., Chang-Gómez, M. A., Tenazoa-Vasquez, G., Gómez-Tuesta, L., López-Vinatea, L. A., Gómez-Matos, H. J., García-Navarro, M. R., & García-Lino, M. E. (2026). *Transformación Digital para la Sostenibilidad Ambiental. IoT, Big Data y cambio climático*. <https://doi.org/10.63618/omeditorial/122>
- Carvajal-Benavides, J. G., Palacios-López, L. A., Paredes-Morán, J. G., Loaiza-Vélez, H. F., Salazar-Cobeña, G. V., Capia-López, J. A. R., Gómez-Matos, H. J., Reategui-Noriega, E. E., Chang-Gómez, M. A., & Marquez-López, M. C. (2026). *Cambio climático y desarrollo sostenible: adaptación, mitigación y resiliencia territorial*. <https://doi.org/10.63618/omeditorial/113>
- Castillo, L. J. C., Del Carmen Martínez Macas, L., López, Y. L. Á., & Cobeña, G. V. S. (2026). *Huella ecológica digital: análisis del impacto ambiental de la educación virtual y optimización mediante IA*. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10642395>
- Cedeño, D. P. C., Quimis, J. J. G., Mieles, A. P. C., Loor, D. J. M., & De la Cruz, C. E. M. (2024). Economía circular como estrategia para la competitividad empresarial. *Ciencia y Desarrollo*, 27(4), 563. <https://doi.org/10.21503/cyd.v27i4.2762>
- Cedeño-Hidalgo, E. R., Del Carmen Cuenca-Tinoco, A., & Cevallos-Uve, G. E. (2019). Prospectiva en la gestión ambiental: modelo y propuesta de sus indicadores. *Polo del Conocimiento*, 4(2), 347. <https://doi.org/10.23857/pc.v4i2.912>

- Chi, Z., Liu, Z., Wang, F., & Osmani, M. (2023). Driving Circular Economy through Digital Technologies: Current Research Status and Future Directions. *Sustainability*, 15(24), 16608. <https://doi.org/10.3390/su152416608>
- Cormier, S. M., & Suter II, G. W. (2008). A framework for fully integrating environmental assessment. *Environmental Management*, 42, 543–556.
- Cueva, F. D. (2014). Efectos del cambio climático en la economía, el comercio internacional y la estrategia empresarial. *Contabilidad y Negocios*, 9(18), 75-98. <https://doi.org/10.18800/contabilidad.201402.005>
- De Miguel, Á. G., Martínez-Hernández, V., De Lourdes Da Silva Leal, M., González-Naranjo, V., & De Bustamante, I. (2012). Del residuo al recurso: Reutilización de aguas para riego de biocombustibles - From waste to resource: Reuse of water for biofuel irrigation. *EPrints IMDEA Water Institute*. <http://www.infoenviro.es/>
- Dolnicar, S., Grün, B., & MacInnes, S. (2025). An efficient five-item New Environmental Paradigm. *Annals Of Tourism Research Empirical Insights*, 6(2), 100196. <https://doi.org/10.1016/j.annale.2025.100196>
- Dunlap, R. E., & Van Liere, K. D. (2008). The «New Environmental Paradigm». *The Journal Of Environmental Education*, 40(1), 19-28. <https://doi.org/10.3200/joe.40.1.19-28>
- Espinoza, A. (2023). Economía circular: una aproximación a su origen, evolución e importancia como modelo de desarrollo sostenible. *Revista de Economía Institucional*, 25(49), 109-134. <https://doi.org/10.18601/01245996.v25n49.06>
- Fernández, J. V. (2022). La gobernanza de los riesgos digitales. *Cuadernos de derecho transnacional*, 14(1), 489-503. <https://doi.org/10.20318/cdt.2022.6695>
- Gams, M., Gu, I. Y., Härmä, A., Muñoz, A., & Tam, V. (2019). Artificial intelligence and ambient intelligence. *Journal Of Ambient Intelligence And Smart Environments*, 11(1), 71-86. <https://doi.org/10.3233/ais-180508>
- García, C., Vivel, M., Torres, C., & Lado, R. (2021). *Digitalización, inteligencia artificial y economía circular*. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=822369>

- García, M. (2016). *Desmontando la paradoja de la sostenibilidad*. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5898199>
- García-Olivares, A. (2022). *Escenarios para una transición energética sostenible*. DigitalCISC. <http://hdl.handle.net/10261/330079>
- Gómez, C. (1994). *El análisis costo beneficio y el medio ambiente*. <https://repositorio.unimagdalena.edu.co/entities/publication/59578aa0-48af-4202-a375-95f70fb49a74>
- González, V. M. (2025). El rol de la inteligencia artificial en la economía circular: diseñando el futuro desde las políticas públicas. *Reporte Climatológico*, 1(1), 92-105. <https://doi.org/10.36390/leyavc37>
- Gudmundsson, H., Hall, R. P., Marsden, G., & Zietsman, J. (2015). Sustainable Transportation: Indicators, Frameworks, and Performance Management. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46924-8>
- Gudynas, E. (2003). Ecología, economía y ética del desarrollo sostenible. *UNM's Digital Repository (University Of New Mexico)*. https://digitalrepository.unm.edu/abya_yala/134
- He, J., Zhang, P., & Lu, X. (2024). The risk-based environmental footprints and sustainability deficits of nations. *Ecological Economics*, 230, 108501. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108501>
- Intriago, D. J. P. (2024b). Estrategias y Modelos de negocio para la transición hacia una Economía Circular en sectores estratégicos de América Latina. *Remulci*, 2, 50-61. <https://doi.org/10.59282/remulci.2.1.821>
- Jinez, J. (2025, 7 agosto). *Sistema para la predicción de variables ambientales (Temperatura, humedad y velocidad del aire) basado en el modelo ARIMA para el proyecto (UNACH-CODESAN-FAO-MAATE)*. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/15815>
- Kebede, A. S., Nicholls, R. J., Clarke, D., Savin, C., & Harrison, P. A. (2021). Integrated assessment of the food-water-land-ecosystems nexus in Europe: Implications for sustainability. *Science of the Total Environment*, 768, 144461.

- Kumar, M. S., Palanichamy, N. V., Shivakumar, K., Chandrakumar, M., Kalpana, M., & Murugananthi, D. (2025). Impact of climate change on global economy: A comprehensive review. *Regional Sustainability*, 6(6), 100274. <https://doi.org/10.1016/j.regsus.2025.100274>
- Leal, J. P. (2014). El concepto de justicia penal restaurativa en la construcción del marco teórico. *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, 6(1). <https://doi.org/10.22335/rlct.v6i1.127>
- Li, J., Tian, Y., Zhang, Y., & Xie, K. (2021). Spatializing environmental footprint by integrating geographic information system into life cycle assessment: A review and practice recommendations. *Journal Of Cleaner Production*, 323, 129113. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129113>
- Lighezzolo, A., Lanfri, M., García, F., Clemoveki, K., Bridera, D., & Scavuzzo, M. (2016). Sistemas de alerta temprana a emergencias ambientales basados en modelos numéricos de predicción meteorológica. *ResearchGate*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/argencon.2016.7585281>
- Loorbach, D. (2009). Transition Management for Sustainable Development: A Prescriptive, Complexity-Based Governance Framework. *Governance*, 23(1), 161-183. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0491.2009.01471.x>
- López, J. G., Cuesta, J. D., & García-Ceca, C. (2024). Inteligencia artificial y medio ambiente. *Revistamultidisciplinar Com*, 6(4), 83-97. <https://doi.org/10.23882/cdig.24270>
- López-Santana, E. R., Méndez-Giraldo, G. A., Ávila-Choconta, H. A., Franco, C., & Rueda-Velasco, F. (2023). Metodologías y aplicaciones de diagnósticos sectoriales: una revisión de la literatura. *Ingeniería*, 28(Suppl), e17872. <https://doi.org/10.14483/23448393.17872>
- Lozano, B., Lamelas, A. S., & García, J. J. P. (2012). *Evaluaciones de impacto ambiental y autorización ambiental integrada: doctrina, textos legales anotados y jurisprudencia*.

- Martínez-Fernández, J., Baños-González, I., & Esteve-Selma, M. Á. (2021). An integral approach to address socio-ecological systems sustainability and their uncertainties. *Science of the Total Environment*, 762, 144457.
- Mayer-Schönberger, V., & Cukier, K. (2013). *Big data: la revolución de los datos masivos*. Turner.
- Maza-Ávila, F., Torres-Fernández, M. A., & Romero-Solano, V. P. (2023). Percepción del riesgo y su incidencia en el comportamiento digital entre estudiantes universitarios. *Educación y Humanismo*, 25(44). <https://doi.org/10.17081/eduhum.25.44.5190>
- Medon, J. J., & Oduleye, T. E. (2024). An Integrated Predictive Analytics Model for Enhancing Strategic Financial Forecasting and Decision Accuracy. *Gyanshauryam International Scientific Refereed Research Journal*, 258-279. <https://doi.org/10.32628/gisrrj247322>
- Mesa, A. V., & Pimienta, O. D. C. (2024). Integración ambiental en la evaluación de diseño: una visión sistémica y de proceso. *Cuadernos del Centro de Estudios de Diseño y Comunicación*, 219. <https://doi.org/10.18682/cdc.vi219.11133>
- Montero, J. V. (2023). *Arquitectura e impacto ambiental: el proyecto como método*. <https://doi.org/10.5821/ebook-9791387613389>
- Navarro, M. G. (2011). Inteligencia ambiental: entornos inteligentes ante el desafío de los procesos inferenciales. *Americanae (AECID Library)*, 15, 184-205. <http://americanae.aecid.es/americanae/es/registros/registro.do?tipoRegistro=MTD&idBib=472104>
- Ochoa, F. J. M., Leyva, M. A. R., Martínez, J. C. R., & Salinas, G. H. (2025). La economía circular como paradigma en transformación: dimensiones filosófico-conceptuales y praxis global. *Tendencias En Energías Renovables y Sustentabilidad*., 4(3), 18-28. <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.416>
- Olawade, D. B., Ijiwade, J. O., Ojo, A., Alabi, J. O., Makanjuola, B. D., & Wada, O. Z. (2026). Digital twin technology for environmental management: Applications, benefits, and implementation challenges. *Environmental Pollution And Management*, 3, 418-435. <https://doi.org/10.1016/j.epm.2026.07.003>

- O'Mahony, T. (2021). Cost-Benefit Analysis and the environment: The time horizon is of the essence. *Environmental Impact Assessment Review*, 89, 106587. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106587>
- Pérez-Pons, M. E., Parra-Dominguez, J., Omatu, S., Herrera-Viedma, E., & Corchado, J. M. (2021). Machine Learning and Traditional Econometric Models: A Systematic Mapping Study. *Journal Of Artificial Intelligence And Soft Computing Research*, 12(2), 79-100. <https://doi.org/10.2478/jaiscr-2022-0006>
- Piscicelli, L. (2023). The sustainability impact of a digital circular economy. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 61, 101251.
- Poveda, E. M. B., & De Giusti, M. R. (2024). *Modelo de Madurez para Preservación Digital*. <https://doi.org/10.61347/ei-lib.2>
- Reyna, J. C. B., Luna, G. H., & Domínguez, C. E. (2025). Análisis Teórico-Conceptual de la huella de carbono. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 9(2), 2570-2590. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i2.17077
- Ríos, I. G., Rodríguez, C. M. Á., & Da Silva, S. T. (2025). *Digitalización del sector público al servicio de la neutralidad climática*. <https://doi.org/10.71237/c92bnwiv>
- Rodríguez, J. J. M., Sayago, J. T., Peralta, J. D., Jaramillo, E. A., Román, P. A. G., Rodríguez, L. A. C., & Duque, D. y. H. (2022). Metodologías para la construcción de índices. En *Metodologías para la construcción de índices*. <https://doi.org/10.25100/peu.685.cap1>
- Romero, A. V., Dávila, M. A. R., Reyes, D. E. C., Sánchez, F. M., Lino, J. L. L., Cañizares, N. G. G., Quijije, E. E. M., Ortega, R. A. S., Hidalgo, R. A. G., & Estupiñan, C. A. P. (2019). *Desarrollo sostenible y medio ambiente*. <https://doi.org/10.21855/librosecotec.42>
- Sacchi, R., Terlouw, T., Siala, K., Dirnaichner, A., Bauer, C., Cox, B., Mutel, C., Daioglou, V., & Luderer, G. (2022). PRospective EnvironMental Impact asSEment (premise): A streamlined approach to producing databases for prospective life cycle assessment using integrated assessment models. *Renewable*

And Sustainable Energy Reviews, 160, 112311.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112311>

Sandoval-Díaz, J., Muñoz, M. N., & Martínez, D. C. (2023). Revisión sistemática sobre la capacidad de adaptación y resiliencia comunitaria ante desastres socionaturales en América Latina y el Caribe. *Revista de Estudios Latinoamericanos Sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER*, 7(2), 187.
<https://doi.org/10.55467/reder.v7i2.132>

Senna, P. P., Barros, A. C., Roca, J. B., & Azevedo, A. (2023). Development of a digital maturity model for Industry 4.0 based on the technology-organization-environment framework. *Computers & Industrial Engineering*, 185, 109645.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109645>

Serra, A., Maia, M. T., Tsiros, P., Minadakis, V., Riudavets-Puig, R., Perello-Y-Bestard, A., Nikiforou, F., Karakoltzidis, A., Di Lieto, E., Schaffert, A., Al-Abdulraheem, Z., Virmani, I., Dziubaniuk, O., Karhukorpi, S., Dokler, J., Zouraris, D., Mintis, D. G., Varsou, D., Tsoumanis, A., . . . Greco, D. (2026). Review on Predictive Models and Integration Strategies for Holistic Impact Assessment of Chemicals and Materials. *Environmental Science & Technology*, 60(5), 3739-3766.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.5c04489>

Tiwari, S. K., Fegade, A., & Kamal, M. (2025). *AI-Driven Environmental Pollution Management*. Springer.

Trollman, H., Colwill, J., & Jagtap, S. (2021). A Circularity Indicator Tool for Measuring the Ecological Embeddedness of Manufacturing. *Sustainability*, 13(16), 8773.
<https://doi.org/10.3390/su13168773>

United Nations Environment Programme. (2007). *GEO Resource Book: A Training Manual on Integrated Environmental Assessment and Reporting*.

Vargas, G. A. M., Villón, D. A. A., Espinal, K. E. O., Muñoz, G. A. L., Alvarado, M. A. Z., Carpio, C. P. N., De los Ángeles Santistevan Villao, M., Rugel, D. E. D., Cifuentes, M. J. R., Córdor, S. E. L., Murillo, L. F. O., Salesiana, U. P., Cedeño, N. P. A., Salesiana, U. P., Garcés, Y. y. M., & Morales, E. H. I. (2025). *Análisis*

del entorno empresarial desde la perspectiva del Sistema DuPont.
<https://doi.org/10.17163/abyaups.120>

Wesche, J., & Hendriks, A. (2026). Understanding sustainability transitions. En *Cambridge University Press eBooks* (pp. 13-142).
<https://doi.org/10.1017/9781009437318.003>

Yassen, M., Noaman, M. S., Hassan, T. A. M. A., Qasim, N. H., Abbas, I., & Khlaponin, Y. (2025). Big data and AI in environmental decision-making: Legal and ethical challenges. *Environment And Social Psychology*, 10(9).
<https://doi.org/10.59429/esp.v10i9.3983>

Zelada, P. A. B., Yáñez, G. L. C., Cajigas, B. Z. L., Lea, G. W. M., Reyna, R. P. M., Panduro, L. P., Vilela, N. R. L., & Mendoza, I. R. (2026). Economía Circular y Gobernanza para el Desarrollo Sostenible: Derecho Ambiental, Agenda 2030 y transformación Institucional. En *CID - Centro de Investigación y Desarrollo eBooks*. https://doi.org/10.37811/cli_w1331

Zhao, J., & Fariñas, B. G. (2022). Artificial Intelligence and Sustainable Decisions. *European Business Organization Law Review*, 24(1), 1-39.
<https://doi.org/10.1007/s40804-022-00262-2>



EDITORIAL ANDES COGNITIO



Adriana Yamilet Herrera Granizo

Economista (Universidad Nacional de Chimborazo), Máster en Economía Circular y Desarrollo Sostenible (Universidad Internacional de Valencia) y Máster en Gestión de Proyectos (Universidad Internacional de Valencia). Ha trabajado como Consultor Senior en INFODATOS), desarrollando actividades de consultoría especializada y asesoría empresarial en el sector privado. Jefe de Auditoría en Hiladera Guijarro, responsable de la planificación, ejecución y supervisión de procesos de auditoría interna. Editor en CEFRO, encargado de la revisión, edición y gestión de contenidos institucionales y editoriales. Editor en jefe del Rist-Dírhham de los Emiratos Árabes Unidos y ScriptSpace Journals de la India, liderando la dirección editorial, coordinación de publicaciones y control de calidad de contenidos. Docente de la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE), impartiendo asignaturas de formación profesional y contribuyendo al desarrollo académico de estudiantes universitarios. Autora de artículos sobre sostenibilidad, teoría de juegos y economía circular en revistas indexadas. Actualmente lidera proyectos sobre inversiones circulares en parques ecoindustriales y simbiosis hídrica.



Fausto Danilo Erazo Guijarro

Economista por la Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ciencias Económicas; Magíster y Doctor en Desarrollo Económico y Sectorial Estratégico por la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, México (UPAEP). Su formación de posgrado se orienta al análisis económico, el desarrollo sectorial y la investigación aplicada. Cuenta con experiencia profesional en los sectores público, privado, financiero y de cooperación para el desarrollo. Su trayectoria comprende la gestión y ejecución de proyectos sociales y productivos, capacitación y formación profesional, análisis crediticio, administración tributaria y consultoría dirigida al fortalecimiento de pequeños productores y organizaciones de la economía social y solidaria. Actualmente ejerce la docencia en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y en la Universidad Central del Ecuador, en asignaturas vinculadas con el análisis económico y los métodos cuantitativos. Sus principales áreas de docencia e investigación son la microeconomía, la teoría de juegos y la investigación operativa.



Natalia Estefanía Herrera Salazar

Economista ecuatoriana, Máster en Competition and Market Regulation por la Barcelona School of Economics y la Universidad Autónoma de Barcelona, formación internacional que cursó mediante una de las dos becas otorgadas para Latinoamérica. Cuenta, además, con estudios especializados en Dirección Financiera y Tributación. Su trayectoria profesional incluye experiencia en la Superintendencia de Competencia Económica y en el Ministerio de Recursos Naturales No Renovables del Ecuador, así como en docencia, investigación y gestión universitaria en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Se ha desempeñado en áreas relacionadas con el análisis económico y financiero, regulación y competencia, evaluación de mercados, formulación y evaluación de proyectos de inversión, estudios econométricos, análisis de políticas públicas e indicadores económicos territoriales. También ha participado en procesos de planificación, ajuste curricular, acreditación, vinculación con la sociedad y acompañamiento de proyectos de investigación y emprendimiento. Su perfil combina experiencia en los sectores público y académico con una sólida formación técnica, capacidad analítica y visión estratégica, orientadas a la toma de decisiones, la eficiencia de los mercados y el desarrollo económico sostenible.



Lilí Carolina Salcedo Vallejo

Economista, docente universitaria e investigadora ecuatoriana, cuenta con una Maestría en Economía por la Universidad Plekhanov de Rusia, obtenida con honores; una Maestría en Ciencias Sociales con mención en Género y Desarrollo por FLACSO Ecuador; y formación de pregrado en Economía con mención en Políticas Públicas por la Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Desde 2019 desarrolla actividades de docencia en la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE y, desde 2024, se desempeña como Coordinadora del Área de Conocimiento de Economía del Departamento de Ciencias Económicas, Administrativas y del Comercio. Previamente, construyó una sólida trayectoria en instituciones estatales, en las áreas de planificación estratégica, seguimiento institucional e inversión pública. Sus intereses de investigación se concentran en economía aplicada, desarrollo socioeconómico, políticas públicas, género y planificación estratégica. Ha participado en publicaciones y estudios sobre seguridad multidimensional, crecimiento económico, empleo y problemáticas públicas en Ecuador, articulando el análisis académico con una visión orientada al fortalecimiento institucional y la formación de profesionales comprometidos con el desarrollo del país.

ISBN: 978-9907-9566-5-8

