



OM
EDITORIAL



Ingeniería para el Desarrollo Sostenible

*Innovación, Tecnología y Soluciones para los Desafíos
del Siglo XXI*

Souza-Najar, Rosa Isabel

Chang-Gómez, Mario Andrew • Valer-Ortiz, Zarahi Ninfa

Gómez-Tuesta, Luis • Dávila-Alva, Emerson

Suarez-Rumiche, Jorge Antonio • Reategui-Noriega, Eddir Erick

Vasquez-Pinedo, Jorge Armando • López-Vinatea, Luis Alberto

García-Navarro, Matsen Rolando

Ingeniería para el Desarrollo Sostenible

Innovación, Tecnología y Soluciones
para los Desafíos del Siglo XXI.

Autor/es:

Souza-Najar, Rosa Isabel

Universidad Nacional de la Amazonía Peruana

Chang-Gómez, Mario Andrew

Universidad Nacional de la Amazonía Peruana

Valer-Ortiz, Zarahi Ninfa

Universidad Tecnológica del Perú

Gómez-Tuesta, Luis

Universidad Nacional de la Amazonía Peruana

Dávila-Alva, Emerson

Universidad Nacional de la Amazonía Peruana

Suarez-Rumiche, Jorge Antonio

Universidad Nacional de la Amazonía Peruana

Reategui-Noriega, Eddir Erick

Universidad Nacional de la Amazonía Peruana

Vasquez-Pinedo, Jorge Armando

Universidad Nacional de la Amazonía Peruana

López-Vinatea, Luis Alberto

Universidad Nacional de la Amazonía Peruana

García-Navarro, Matsen Rolando

Universidad Nacional de la Amazonía Peruana

Datos de Catalogación Bibliográfica

Souza-Najar, R. I.
Chang-Gómez, M. A.
Valer-Ortiz, Z. N.
Gómez-Tuesta, L.
Dávila-Alva, E.
Suarez-Rumiche, J. A.
Reategui-Noriega, E. E.
Vasquez-Pinedo, J. A.
López-Vinatea, L. A.
García-Navarro, M. R.

Ingeniería para el Desarrollo Sostenible: Innovación, Tecnología y Soluciones para los Desafíos del Siglo XXI
Oriente-Manabí Editorial, Ecuador, 2026
ISBN: 978-9907-9567-3-3
Formato: 210 cm X 270 cm

79 págs.



Publicado por Oriente-Manabí Editorial

Ecuador, Manabí, Cod. Post. 130101.

Contacto: +593 959 723 343

Email: info@omeditorial.com

www.books.omeditorial.com

Director General:	<i>Dr. Guerrero Bermúdez Ángel Enrique</i>
Editor en Jefe:	<i>Dr. Guerrero Bermúdez Ángel Enrique</i>
Editor Académica:	<i>Lcdo. Oltramonti Roberto, Mg</i>
Supervisor de Producción:	<i>Ing. Barragán Monrroy Roberto Johan, Mg.</i>
Diseño:	OM Editorial
Consejo Editorial	<i>OM Editorial</i>

© Agosto, 2026

Libro Digital, Primera Edición, 2026

Editado, Diseñado, Diagramado y Publicado por [Comité OM Editorial](#)

Manabí, Ecuador, 2026

D.R. © 2026 por Autores y OM Editorial Ecuador.

Cámara Ecuatoriana del Libro con Radicación editorial 182865

Disponible para su descarga gratuita en www.books.omeditorial.com

Los contenidos de este libro pueden ser descargados, reproducidos, difundidos e impresos con fines de estudio, investigación y docencia o para su utilización en productos o servicios no comerciales, siempre que se reconozca adecuadamente a los autores como fuente y titulares de los derechos de propiedad intelectual, sin que ello implique en modo alguno que aprueban las opiniones, productos o servicios resultantes. En el caso de contenidos que indiquen expresamente que proceden de terceros, deberán dirigirse a la fuente original indicada para gestionar los permisos.

Título del libro:

Ingeniería para el Desarrollo Sostenible: Innovación, Tecnología y Soluciones para los Desafíos del Siglo XXI.

© Souza-Najar, Rosa Isabel; Chang-Gómez, Mario Andrew; Valer-Ortiz, Zarahi Ninfa; Gómez-Tuesta, Luis; Dávila-Alva, Emerson; Suarez-Rumiche, Jorge Antonio; Reategui-Noriega, Eddir Erick; Vasquez-Pinedo, Jorge Armando; López-Vinatea, Luis Alberto; García-Navarro, Matsen Rolando.

ISBN: 978-9907-9567-3-3



<https://doi.org/10.63618/omeditorial/I27>

Como citar (APA 7ma Edición):

Souza-Najar, R. I., López-Vinatea, L. A., Vasquez-Pinedo, J. A., Reategui-Noriega, E. E., Suarez-Rumiche, J. A., Dávila-Alva, E., Gómez-Tuesta, L., Valer-Ortiz, Z. N., Chang-Gómez, M. A., & García-Navarro, M. R. (2026). *Ingeniería para el Desarrollo Sostenible: Innovación, Tecnología y Soluciones para los Desafíos del Siglo XXI*. Oriente-Manabí Editorial. <https://doi.org/10.63618/omeditorial/I27>

Cada uno de los textos de OM Editorial han sido sometido a un proceso de evaluación por pares doble ciego externos (double-blind paper review) con base en la normativa del editorial.

Revisores:



Ing. Juan Manuel Guerrero
Calero, PhD

Universidad Estatal del Sur de
Manabí– Ecuador



Ing. Mayra Lisette Zapata
Velasco, PhD

Universidad Estatal del Sur de
Manabí– Ecuador



Aviso Legal:

La información presentada, así como el contenido, fotografías, gráficos, cuadros, tablas y referencias de este manuscrito es de exclusiva responsabilidad del/los autores/es y no necesariamente reflejan el pensamiento de la OM Editorial.

Derechos de autor ©

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



El “copyright” y todos los derechos de propiedad intelectual y/o industrial sobre el contenido de esta edición son propiedad de la OM Editorial y sus Autores. Se prohíbe rigurosamente, bajo las sanciones en las leyes, la producción o almacenamiento total y/o parcial de esta obra, ni su tratamiento informático de la presente publicación, incluyendo el diseño de la portada, así como la transmisión de la misma de ninguna forma o por cualquier medio, tanto si es electrónico, como químico, mecánico, óptico, de grabación o bien de fotocopia, sin la autorización de los titulares del copyright, salvo cuando se realice con fines académicos o científicos y estrictamente no comerciales y gratuitos, debiendo citar en todo caso a la editorial. Las opiniones expresadas en los capítulos son responsabilidad de los autores

Reseña de Autores



Souza-Najar, Rosa Isabel



Universidad Nacional de la Amazonía
Peruana



rosa.souza@unapiquitos.edu.pe



<https://orcid.org/0000-0002-7359-3332>



Ingeniera Química egresada de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), con Maestría y Doctorado en Ingeniería Química Ambiental por la Universidad Nacional de Trujillo (UNT). Se desempeña como docente de Química Analítica en la Facultad de Ingeniería Química de la UNAP. Cuenta con experiencia en investigación enfocada en el estudio de compuestos bioactivos de plantas con potencial hipoglucemiante, así como en el asesoramiento de tesis de pregrado en temas ambientales. Su trayectoria académica integra la química aplicada con enfoques sostenibles, orientados a la generación de conocimiento y soluciones frente a los desafíos ambientales contemporáneos.



Chang-Gómez, Mario Andrew



Universidad Nacional de la Amazonía
Peruana



mario.chang@unapiquitos.edu.pe



<https://orcid.org/0009-0003-4287-5868>



Ingeniero Químico egresado de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), con Maestría en Ciencias y Tecnologías Ambientales, con mención en Industria del Petróleo y Medio Ambiente, y candidato a Doctor en Ciencias Ambientales por la misma institución. Se desempeña como docente en la Facultad de Ingeniería Química de la UNAP, donde desarrolla labores de enseñanza e investigación orientadas al desarrollo sostenible, con énfasis en la innovación tecnológica, el aprovechamiento de recursos naturales y la búsqueda de soluciones a problemáticas ambientales contemporáneas. Su trabajo académico y científico se enfoca en contribuir al desarrollo de la Amazonía mediante propuestas sostenibles que integran ciencia, ingeniería y responsabilidad ambiental.



Valer-Ortiz, Zarahi Ninfa



Universidad Tecnológica del Perú



C33959@utp.edu.pe



<https://orcid.org/0009-0009-6836-8294>



Ingeniera Ambiental con experiencia en gestión ambiental, sostenibilidad y cumplimiento normativo, con énfasis en los sectores de hidrocarburos y energía. Ha liderado y participado en proyectos vinculados a la gestión de permisos, evaluación de impactos, fiscalización ambiental y gestión de riesgos, asegurando el cumplimiento de la legislación vigente. Se desempeña además como docente universitaria, contribuyendo a la formación de profesionales con enfoque en responsabilidad ambiental y mejora continua. Su trayectoria integra la práctica técnica con la gestión sostenible, promoviendo la aplicación de soluciones innovadoras frente a los desafíos del sector. En la presente obra, aporta una visión orientada a la sostenibilidad, la innovación y la gestión eficiente de los recursos, destacando el rol de la ingeniería ambiental en la generación de soluciones para los retos del siglo XXI.



Gómez-Tuesta, Luis



Universidad Nacional de la Amazonía
Peruana



luis.gomez@unapiquitos.edu.pe



<https://orcid.org/0000-0002-3860-9714>



Ingeniero Químico con Maestría en Gestión Empresarial y Doctor en Ciencias Empresariales, además de candidato a Doctor en Ciencias Ambientales por la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP). Se desempeña como docente universitario en las áreas de física y biofísica, orientadas a la formación de profesionales en ingeniería y ciencias biomédicas. Ha dirigido investigaciones de pregrado en ingeniería química, abordando temas como la caracterización de macronutrientes en sedimentos acuícolas, optimización de sistemas de bombeo y procesos de fermentación alcohólica. Su enfoque integra la ingeniería de procesos, la gestión empresarial y la sostenibilidad, promoviendo soluciones con impacto técnico, económico y ambiental. Su formación multidisciplinaria le permite aportar una visión integral sobre la viabilidad de alternativas energéticas sostenibles, especialmente en contextos rurales y amazónicos, contribuyendo al desarrollo sostenible.



Dávila-Alva, Emerson



Universidad Nacional de la Amazonía
Peruana



emersondavila17@gmail.com



<https://orcid.org/0009-0004-6085-7978>



Ingeniero Químico por la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), con Maestría en Ciencias y Tecnologías Ambientales y especialización en Seguridad y Medio Ambiente en la industria de hidrocarburos. Cuenta con una trayectoria de más de 15 años en el sector Oil & Gas, destacando en la gestión, inspección y operación de sistemas de seguridad, prevención de incendios y control de derrames en instalaciones de exploración y producción, plantas de procesamiento, tanques de almacenamiento y oleoductos. Posee sólida formación en Seguridad de Procesos y amplio dominio de estándares internacionales como NFPA, ANSI, OSHA e ISO 14000, aplicados al ámbito hidrocarburífero. Ha desarrollado labores como consultor en Sistemas Integrados de Gestión, así como en capacitación especializada en Seguridad Industrial, Protección Ambiental y respuesta ante emergencias.



Suarez-Rumiche, Jorge Antonio



Universidad Nacional de la Amazonía
Peruana



jorgeantonio.suarez@unapiquitos.edu.pe



<https://orcid.org/0000-0001-6823-8734>



Ingeniero Químico egresado de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), con Maestría en Ciencias con mención en Ecología y Desarrollo Sostenible y Doctor en Ingeniería Química Ambiental por la Universidad Nacional de Trujillo. Se desempeña como docente en la Facultad de Ingeniería Química de la UNAP, adscrito al Departamento Académico de Química, donde ha asumido también responsabilidades de gestión académica. Cuenta con experiencia en la formulación y ejecución de proyectos de investigación orientados al desarrollo sostenible y la ingeniería aplicada. Su trayectoria se caracteriza por el compromiso académico, la capacidad de trabajo colaborativo y la orientación a la innovación. Su perfil integral le permite aportar a la presente obra una visión enfocada en la sostenibilidad y la aplicación de la ingeniería frente a los desafíos ambientales actuales.



Reategui-Noriega, Eddir Erick



Universidad Nacional de la Amazonía
Peruana



eddir.reategui@unapiquitos.edu.pe



<https://orcid.org/0009-0003-8364-1304>



Ingeniero Químico y Magíster en Gestión Ambiental por la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP). Se desempeña como docente en la Facultad de Ingeniería Química. Su labor académica se orienta a la integración de la ingeniería con enfoques sostenibles, promoviendo el uso de herramientas innovadoras para la mejora de los procesos educativos en la formación de profesionales. Ha incorporado el análisis de datos e indicadores académicos como soporte para la toma de decisiones, fortaleciendo la calidad del aprendizaje en educación superior. En el marco de la presente obra, aporta una perspectiva centrada en la innovación, la tecnología y la aplicación de soluciones sostenibles, destacando el potencial del Learning Analytics como herramienta para enfrentar los desafíos actuales de la educación universitaria y contribuir al desarrollo sostenible.



Vasquez-Pinedo, Jorge Armando



Universidad Nacional de la Amazonía
Peruana



jorge.armando@unapiquitos.edu.pe



<https://orcid.org/0000-0002-8811-4832>



Ingeniero Químico por la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), Magíster en Gestión Pública y Doctor en Ciencias Empresariales por la misma universidad. Su trayectoria académica y profesional se caracteriza por la integración de la ingeniería, la investigación y la gestión estratégica, con énfasis en la innovación, la sostenibilidad y la mejora continua. Ha desarrollado actividades en docencia, investigación y gestión, promoviendo la aplicación de soluciones tecnológicas orientadas al uso eficiente de los recursos y al desarrollo sostenible. Sus líneas de interés comprenden la ingeniería de procesos, la gestión pública, la innovación tecnológica, el desarrollo organizacional y la sostenibilidad. Su labor se orienta a la generación y transferencia de conocimiento científico, contribuyendo al fortalecimiento de capacidades profesionales y al desarrollo de propuestas que respondan a los desafíos científicos, tecnológicos y sociales del siglo XXI.



López-Vinatea, Luis Alberto



Universidad Nacional de la Amazonía
Peruana



luisalberto.lopez@unapiquitos.edu.pe



<https://orcid.org/0009-0004-3333-6464>



Ingeniero Químico egresado de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), con Maestría en Ecología y Desarrollo Sostenible por la misma institución. Cuenta además con estudios concluidos en la Maestría en Química de Productos Naturales por la Universidade Federal do Pará (UFPA, Brasil) y formación doctoral en Ambiente y Desarrollo Sostenible en la UNAP. Su trayectoria académica se orienta a la integración de la ingeniería química con el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales y la conservación ambiental. Su enfoque multidisciplinario le permite contribuir con una visión que articula innovación, tecnología y sostenibilidad, aportando al análisis y desarrollo de soluciones frente a los desafíos ambientales contemporáneos, especialmente en contextos amazónicos.



García-Navarro, Matsen Rolando



Universidad Nacional de la Amazonía
Peruana



matsen.garcia@unapiquitos.edu.pe



<https://orcid.org/0000-0001-7794-7815>



Ingeniero Químico egresado de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), con Maestría y Doctorado en Ingeniería Química Ambiental por la Universidad Nacional de Trujillo. Su formación de posgrado, complementada con estudios de especialización en Seguridad, Salud Ocupacional y Medio Ambiente, así como su experiencia en docencia universitaria, le confieren una sólida base técnica y aplicada. Su trayectoria profesional se orienta a la implementación de soluciones sostenibles en el ámbito industrial, integrando principios de seguridad de procesos, gestión ambiental e innovación tecnológica. En el marco de la presente obra, aporta una visión enfocada en el desarrollo sostenible, destacando la importancia de la ingeniería como herramienta clave para enfrentar los desafíos ambientales y promover prácticas responsables en el sector productivo.

Índice

Reseña de Autores	V
Índice	xv
Índice de Tablas.....	xx
Índice de Figuras	xxi
Introducción	xxii
Capítulo I: Ingeniería, sostenibilidad y crisis socioambiental del siglo XXI.....	1
1.1. Desarrollo sostenible y transformación de la ingeniería	2
1.1.1. Evolución del desarrollo sostenible: del crecimiento económico a los límites planetarios.....	3
1.1.2. La ingeniería como agente de transformación socioambiental	4
1.1.3. Pensamiento sistémico, interdisciplinariedad y complejidad	5
1.2. Agenda 2030: avances, tensiones y responsabilidades	6
1.2.1. Balance mundial de los Objetivos de Desarrollo Sostenible	6
1.2.2. Interdependencias, sinergias y conflictos entre los ODS	7
1.2.3. Contribución de la ingeniería al cumplimiento y evaluación de las metas	8
1.3. Crisis climática, biodiversidad y recursos naturales	9
1.3.1. Cambio climático, vulnerabilidad y riesgos sistémicos	9
1.3.2. Pérdida de biodiversidad y degradación de los ecosistemas	10
1.3.3. Presión sobre el agua, el suelo, los minerales y otros recursos estratégicos	11
1.4. Desigualdad, territorio y brechas de desarrollo	12
1.4.1. Distribución social y territorial de los beneficios y daños tecnológicos.....	12
1.4.2. Brechas de infraestructura, conectividad y capacidades productivas	13

1.4.3.	Justicia climática, transición justa e inclusión.....	14
1.5.	Evaluación crítica de las soluciones de ingeniería	14
1.5.1.	Ciclo de vida, huellas ambientales y eficiencia de recursos	15
1.5.2.	Externalidades, efecto rebote y desplazamiento de impactos	15
1.5.3.	Criterios ambientales, sociales, técnicos y económicos para la toma de decisiones	16
Capítulo II: Tecnologías e innovaciones para la transición sostenible		19
2.1.	Sistemas energéticos bajos en carbono.....	20
2.1.1.	Energías renovables y aprovechamiento sostenible de recursos energéticos	21
2.1.2.	Almacenamiento, hidrógeno de bajas emisiones y electrificación	22
2.1.3.	Redes inteligentes, generación distribuida y comunidades energéticas	23
2.2.	Ingeniería del agua, saneamiento y seguridad alimentaria.....	24
2.2.1.	Gestión integrada, captación y uso eficiente del agua	24
2.2.2.	Tratamiento, reutilización y saneamiento sostenible	25
2.2.3.	Tecnologías para agricultura resiliente y producción alimentaria sostenible.....	26
2.3.	Producción limpia, materiales y descarbonización industrial	27
2.3.1.	Eficiencia energética y reducción de emisiones en procesos industriales.....	27
2.3.2.	Biomateriales, materiales avanzados y sustitución de sustancias peligrosas	28
2.3.3.	Ecodiseño, manufactura sostenible y evaluación del ciclo de vida	29
2.4.	Transformación digital al servicio de la sostenibilidad	29
2.4.1.	Inteligencia artificial y sistemas de apoyo a decisiones	30
2.4.2.	Internet de las cosas, sensores y monitoreo ambiental	30

2.4.3.	Gemelos digitales, automatización y mantenimiento predictivo..	31
2.5.	Límites y riesgos de las tecnologías emergentes	32
2.5.1.	Consumo energético, materiales críticos y residuos tecnológicos	32
2.5.2.	Ciberseguridad, privacidad, sesgos y dependencia tecnológica	32
2.5.3.	Madurez tecnológica, escalabilidad y pertinencia territorial	33
Capítulo III: Soluciones territoriales, infraestructura		36
y economía circular		36
3.1.	Infraestructura sostenible y resiliente	38
3.1.1.	Planificación, diseño y construcción con criterios climáticos	38
3.1.2.	Adaptación y rehabilitación de infraestructura existente.....	39
3.1.3.	Gestión, mantenimiento y continuidad de servicios esenciales ..	40
3.2.	Ciudades, movilidad y hábitat sostenible	40
3.2.1.	Ordenamiento territorial y crecimiento urbano compacto e inclusivo	41
3.2.2.	Movilidad sostenible, electrificación y transporte multimodal.....	41
3.2.3.	Edificaciones eficientes, accesibles y saludables.....	42
3.3.	Economía circular y gestión integral de recursos	43
3.3.1.	Prevención, reducción, reutilización, reparación y reciclaje.....	43
3.3.2.	Simbiosis industrial, logística inversa y cadenas circulares.....	44
3.3.3.	Valorización de residuos, bioeconomía y nuevos modelos productivos	45
3.4.	Soluciones basadas en la naturaleza y resiliencia ecosistémica	45
3.4.1.	Infraestructura verde y azul para la adaptación climática.....	46
3.4.2.	Restauración ecológica, control de inundaciones y protección costera	46
3.4.3.	Integración de conocimientos científicos, locales y ancestrales .	47
3.5.	Ingeniería para el Sur Global, América Latina y Perú.....	48

3.5.1. Transferencia tecnológica, innovación frugal y apropiación comunitaria	48
3.5.2. Respuestas para territorios rurales, amazónicos, costeros e insulares	49
3.5.3. Experiencias, aprendizajes y posibilidades de escalamiento en Perú	49
Capítulo IV: Gobernanza, ética y futuro de la ingeniería sostenible.....	52
4.1. Políticas públicas y gobernanza de la innovación	54
4.1.1. Instituciones, planificación y coordinación multinivel.....	54
4.1.2. Regulación, normalización técnica y contratación pública sostenible.....	55
4.1.3. Participación ciudadana y gestión de conflictos sociotécnicos ...	58
4.2. Financiamiento y viabilidad de las transformaciones.....	59
4.2.1. Inversión pública, financiamiento climático y cooperación internacional	59
4.2.2. Modelos de negocio, emprendimiento e innovación social.....	62
4.2.3. Costos, beneficios, riesgos y distribución del valor	63
4.3. Ética y responsabilidad profesional	64
4.3.1. Principios éticos para el diseño y la innovación tecnológica.....	64
4.3.2. Derechos humanos, equidad de género y protección de comunidades vulnerables	65
4.3.3. Transparencia, rendición de cuentas y licencia social para operar	66
4.4. Medición, seguimiento y aprendizaje	67
4.4.1. Indicadores integrados de sostenibilidad y resiliencia	67
4.4.2. Evaluación multicriterio, análisis de riesgos y costo-beneficio....	68
4.4.3. Monitoreo, adaptación y aprendizaje a partir de resultados	69
4.5. Formación y escenarios de la ingeniería posterior a 2030	70

4.5.1. Competencias profesionales para sistemas complejos y transiciones sostenibles	70
4.5.2. Investigación interdisciplinaria, ciencia abierta y cooperación	71
4.5.3. Escenarios emergentes y agenda propositiva para la ingeniería del futuro	72
Referencias Bibliográficas.....	76

Índice de Tablas

Tabla 1. Comparación cualitativa de opciones renovables	22
Tabla 2. Filtro de decisión para seleccionar y escalar tecnologías	34
Tabla 3. Casos comprobables y condiciones de transferencia	51
Tabla 4. Instrumentos públicos y su función en una transición tecnológica	58
Tabla 5. Diferencias entre mecanismos de financiamiento	62
Tabla 6. Núcleo de indicadores integrados para proyectos sostenibles	68
Tabla 7. Escenarios posteriores a 2030 y respuesta de ingeniería	73
Tabla 8. Escenarios posteriores a 2030 y respuesta de ingeniería	73

Índice de Figuras

Figura 1. Arquitectura multinivel de gobernanza para proyectos de ingeniería sostenible.....	59
Figura 2. Ciclo de seguimiento y aprendizaje adaptativo.....	70

Introducción

La ingeniería ha acompañado buena parte de las transformaciones que hoy definen la vida colectiva. Carreteras, sistemas de agua, redes eléctricas, edificaciones, procesos industriales y plataformas digitales han ampliado las posibilidades de producir, comunicarse y acceder a servicios. Ese progreso convive, sin embargo, con señales que ya no pueden tratarse como efectos secundarios menores: alteración del clima, degradación de ecosistemas, presión sobre el agua y los materiales, acumulación de residuos y desigualdades que determinan quién recibe los beneficios y quién soporta los daños. Esta obra nace de esa tensión. Su punto de partida no es una descalificación del desarrollo técnico, sino una pregunta más exigente sobre su rumbo, sus límites y su capacidad para sostener el bienestar sin deteriorar las bases ecológicas y sociales de las que depende.

Hablar de ingeniería para el desarrollo sostenible supone ampliar la mirada profesional. La seguridad, la funcionalidad y el costo continúan siendo condiciones indispensables, pero ya no bastan para valorar una solución. También importa saber de dónde provienen los materiales, cuánta energía se consume, qué ocurre durante la operación, quién podrá mantener el sistema y cuál será su destino cuando termine la vida útil. A estas preguntas se suman otras de carácter humano: qué necesidades se atienden primero, cómo se distribuyen los riesgos, qué voces participan en las decisiones y qué capacidades quedan instaladas en el territorio. El trabajo técnico adquiere así una dimensión pública. Cada elección de diseño puede abrir oportunidades, consolidar dependencias o modificar durante décadas la relación entre comunidades, instituciones y naturaleza.

La dificultad radica en que los problemas abordados no aparecen de forma aislada. Una respuesta energética puede reducir emisiones y aumentar la demanda de minerales; una obra de protección puede disminuir un riesgo local y trasladarlo aguas abajo; una tecnología de riego puede mejorar el rendimiento y, al abaratar el uso del recurso, favorecer una extracción mayor. Incluso las innovaciones bien intencionadas producen consecuencias imprevistas cuando se observan fuera de su entorno inmediato. Por eso, la sostenibilidad exige

reconocer conexiones, demoras, efectos rebote y conflictos entre objetivos legítimos. No existe una fórmula capaz de resolverlos de una vez. Se requieren análisis de ciclo de vida, comparación de alternativas, criterios de suficiencia, lectura territorial y mecanismos de seguimiento que permitan corregir decisiones cuando la evidencia muestre resultados distintos de los esperados.

La innovación ocupa un lugar decisivo en este recorrido, aunque no se presenta como una promesa automática de solución. Energías renovables, almacenamiento, reúso de agua, agricultura de precisión, materiales de menor impacto, sensores, inteligencia artificial y mantenimiento predictivo pueden contribuir a transformar sectores completos. Su valor depende de las condiciones bajo las cuales se desarrollan y utilizan. Una tecnología eficiente, pero inaccesible, difícil de reparar o subordinada a un proveedor único puede agravar vulnerabilidades existentes. El conocimiento científico y la capacidad digital resultan más útiles cuando dialogan con la experiencia operativa, las necesidades sociales y los saberes construidos en cada territorio. Innovar implica crear dispositivos y procesos, pero también adaptar, simplificar, organizar y aprender para que el desempeño real se acerque a los objetivos anunciados.

Esta tarea compromete a más actores que los equipos de diseño. Las universidades forman profesionales y producen conocimiento; las empresas organizan inversiones y cadenas de suministro; el Estado fija prioridades, regula, contrata y protege derechos; las organizaciones sociales y las comunidades aportan experiencia sobre los usos cotidianos, los riesgos y las condiciones de mantenimiento. La ciudadanía, lejos de ser una receptora pasiva, debe intervenir en las decisiones que afectan su entorno y su forma de vida. La coordinación entre estas responsabilidades permite evitar proyectos sin operador, infraestructuras que envejecen antes de tiempo o soluciones que funcionan técnicamente mientras pierden legitimidad social. La sostenibilidad se vuelve concreta cuando existen competencias definidas, recursos para operar, información comprensible, participación efectiva y disposición institucional para responder por los resultados.

El Perú ofrece un referente especialmente valioso para examinar estas cuestiones. Su diversidad geográfica reúne una costa sometida a escasez

hídrica y expansión urbana, territorios andinos marcados por dispersión poblacional y exposición a múltiples amenazas, y una Amazonía donde la infraestructura interactúa con dinámicas fluviales, biodiversidad y derechos colectivos. A ello se añaden brechas persistentes de servicios, capacidades públicas desiguales y actividades extractivas vinculadas tanto a la economía nacional como a las cadenas globales de transición. Esta pluralidad impide aplicar una receta uniforme. Las metodologías pueden compartir principios de seguridad, ciclo de vida, participación y evaluación, pero las soluciones necesitan ajustarse a climas, culturas, escalas, recursos y posibilidades reales de gestión.

Muchos de esos desafíos atraviesan también a América Latina. La región combina una extraordinaria riqueza ecológica con ciudades segregadas, déficits de infraestructura, economías dependientes de materias primas y una alta exposición a fenómenos climáticos. Al mismo tiempo, dispone de capacidades científicas, experiencias comunitarias y prácticas de innovación que permiten construir respuestas propias. La cooperación regional puede facilitar datos, estándares, formación, investigación y aprendizajes comunes, siempre que respete la diversidad de cada país y evite la copia mecánica de modelos externos. Mirar el contexto latinoamericano amplía la conversación: muestra que la transición sostenible no consiste únicamente en sustituir equipos o fuentes energéticas, sino en fortalecer instituciones, reducir desigualdades y conservar la posibilidad de decidir sobre el territorio y sus recursos.

El propósito del libro es ofrecer un marco crítico y propositivo para comprender esa transformación. No se busca reunir un catálogo de tecnologías supuestamente verdes ni presentar la sostenibilidad como una etiqueta que pueda añadirse al final de un proyecto. La obra relaciona fundamentos, herramientas, aplicaciones territoriales y condiciones de gobernanza para acompañar decisiones más completas. A lo largo de sus páginas se examinan posibilidades reales, límites técnicos, riesgos sociales y criterios de evaluación. El lector encontrará una invitación a contrastar alternativas, identificar impactos desplazados y pensar en la operación y el mantenimiento desde el inicio. El aporte central reside en conectar el rigor ingenieril con la responsabilidad

ambiental, la justicia social y la capacidad institucional necesaria para sostener los resultados.

El primer capítulo construye la base conceptual de ese análisis. Allí se revisa cómo la idea de desarrollo sostenible amplió las responsabilidades de la ingeniería y obligó a relacionar crecimiento, límites ecológicos y bienestar. La crisis climática, la pérdida de biodiversidad y la presión sobre los recursos se estudian junto con las desigualdades sociales y territoriales que condicionan sus efectos. El capítulo también examina las tensiones presentes en las metas internacionales de desarrollo y propone criterios para evaluar las soluciones más allá de su rendimiento inmediato. Pensamiento sistémico, interdisciplinariedad, ciclo de vida, resiliencia y justicia aparecen como componentes de una misma forma de razonar, orientada a comprender el sistema antes de optimizar una de sus partes.

Sobre esa base, el segundo capítulo explora tecnologías e innovaciones aplicables a la transición, mientras el tercero traslada el análisis a la escala de los territorios. El recorrido abarca sistemas energéticos de bajas emisiones, agua y saneamiento, producción alimentaria, industria, materiales y herramientas digitales, sin ocultar sus demandas de energía, recursos, seguridad y capacidad operativa. Luego, la atención se dirige a la infraestructura resiliente, la movilidad, el hábitat, la economía circular y las soluciones basadas en la naturaleza. Ambos capítulos se complementan: uno permite comparar opciones y grados de madurez; el otro muestra que su pertinencia depende de la localización, el servicio que sostienen, la población involucrada y las instituciones capaces de mantenerlas.

El cuarto capítulo completa el trayecto al examinar las condiciones que convierten una alternativa prometedora en una transformación duradera. Políticas públicas, regulación, contratación, financiamiento y participación ciudadana se vinculan con la ética profesional y la distribución de beneficios, costos y riesgos. También se abordan la medición del desempeño, la rendición de cuentas y el aprendizaje a partir de resultados, porque un proyecto no puede juzgarse únicamente por haber sido inaugurado o por cumplir una especificación inicial. La reflexión alcanza la formación de quienes ejercerán la ingeniería en los

próximos años y plantea escenarios abiertos, marcados por incertidumbre climática, digitalización y cambios productivos. El futuro aparece como un espacio de decisión que exige preparación, no como un pronóstico cerrado

**Capítulo I: Ingeniería, sostenibilidad y crisis
socioambiental del siglo XXI**

Ingeniería, sostenibilidad y crisis socioambiental del siglo XXI

La ingeniería ocupa una posición ambivalente frente a la crisis socioambiental del siglo XXI. Sus obras, sistemas productivos y tecnologías han ampliado la movilidad, la salud pública, la seguridad alimentaria, la conectividad y el acceso a servicios básicos. Esos mismos sistemas también sostienen patrones intensivos de extracción, urbanización, consumo energético y generación de residuos. La cuestión central ya no consiste en decidir si la ingeniería contribuye al desarrollo, sino en precisar qué desarrollo favorece, para quién, durante cuánto tiempo y a costa de qué territorios y ecosistemas.

El diagnóstico contemporáneo obliga a abandonar la idea de problemas ambientales aislados. Richardson et al. (2023) comprobaron que seis de los nueve límites planetarios evaluados se encontraban transgredidos en 2023. El IPCC (2023) mostró, a su vez, que el calentamiento antropogénico ya produce daños generalizados y que las posibilidades de un desarrollo resiliente al clima disminuyen con cada incremento de temperatura. Estas alteraciones interactúan con desigualdades históricas, instituciones frágiles y brechas de infraestructura. Una inundación, una sequía o una interrupción energética no afectan por igual a todos: el daño depende de la exposición, la calidad de los servicios, la capacidad económica y la participación real en las decisiones.

Este capítulo construye un marco para leer esas conexiones. Examina la transformación del desarrollo sostenible, el balance crítico de la Agenda 2030, la crisis climática y ecológica, las desigualdades territoriales y los criterios necesarios para evaluar soluciones de ingeniería. Perú aparece como referente nacional cuando aporta una evidencia concreta; América Latina y el Sur Global amplían el contexto. El propósito no es atribuir a la tecnología una capacidad automática de reparación, sino situar las decisiones técnicas dentro de sistemas sociales, ecológicos, económicos y políticos.

1.1. Desarrollo sostenible y transformación de la ingeniería

El desarrollo sostenible modificó el campo de responsabilidad de la ingeniería. Diseñar con seguridad estructural, funcionalidad y costo controlado sigue siendo

indispensable, pero ya no resulta suficiente. La práctica profesional debe considerar emisiones, materiales, biodiversidad, salud, trabajo, distribución territorial de beneficios, mantenimiento, resiliencia y destino final. Esta ampliación no debilita el rigor técnico; lo conecta con las condiciones que determinan si una solución conserva su utilidad a lo largo del tiempo.

1.1.1. Evolución del desarrollo sostenible: del crecimiento económico a los límites planetarios

Durante buena parte del siglo XX, el desarrollo se midió mediante el crecimiento del producto, la industrialización y la expansión de infraestructura. La naturaleza aparecía como una reserva de insumos y un receptor de residuos con capacidad aparentemente amplia. El informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (1987) cambió el lenguaje internacional al vincular las necesidades presentes con la capacidad de las generaciones futuras. Aun así, la fórmula permitió interpretaciones compatibles con un crecimiento material continuo, siempre que este fuese más eficiente o estuviese acompañado por medidas de compensación.

La evidencia acumulada cuestiona esa confianza. El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2024) advierte que la extracción mundial de recursos se ha triplicado en las últimas cinco décadas y, sin cambios profundos, podría aumentar otro 60 % hacia 2060 respecto de 2020. El problema no se reduce a la escasez física: la extracción y el procesamiento concentran impactos climáticos, contaminación, pérdida de hábitat y conflictos distributivos. Mejorar la productividad material es necesario, pero una economía que crece más rápido que sus ganancias de eficiencia puede incrementar la presión absoluta.

Richardson et al. (2023) ofrecen un marco más exigente. Los límites planetarios describen procesos biofísicos cuya alteración aumenta el riesgo de cambios abruptos o irreversibles. En 2023 estaban transgredidos los límites asociados al clima, la integridad de la biosfera, el cambio del sistema terrestre, el agua dulce, los flujos biogeoquímicos y las entidades novedosas. Esta lectura desplaza la sostenibilidad desde una mejora relativa —menos impacto por unidad

producida— hacia la suficiencia absoluta: el desempeño debe ser compatible con presupuestos ecológicos finitos.

El desarrollo sostenible adquiere así una doble condición. Debe garantizar una base social digna y, simultáneamente, respetar los sistemas que sostienen la vida. Para la ingeniería, esto significa definir necesidades antes de elegir tecnologías, comparar alternativas de demanda y oferta, y reconocer que no toda expansión de capacidad equivale a bienestar. Una solución puede ser eficiente en planta y, sin embargo, aumentar el daño total si estimula mayor consumo, induce urbanización riesgosa o desplaza la extracción hacia otro territorio.

1.1.2. La ingeniería como agente de transformación socioambiental

Las decisiones de ingeniería materializan reglas de acceso y uso. Una carretera reorganiza mercados y ocupación del suelo; una represa distribuye agua, energía, riesgos y desplazamientos; una plataforma digital determina quién puede conectarse y bajo qué condiciones; una planta minera vincula minerales estratégicos con relaves, empleo, consumo hídrico y renta pública. El artefacto nunca actúa solo. Funciona dentro de instituciones, cadenas de suministro, hábitos y relaciones de poder que amplifican o limitan sus efectos.

La aparente neutralidad técnica suele surgir cuando el problema se formula de manera estrecha. Si una evaluación pregunta únicamente por el menor costo de generación eléctrica, deja fuera la tenencia de la tierra, la estabilidad de la red, el empleo local, los minerales incorporados y el consentimiento de las comunidades. La optimización responde correctamente a la función objetivo que recibe; el sesgo puede estar en aquello que se decidió no medir. La responsabilidad profesional comienza, por tanto, antes del cálculo: incluye la definición del problema, los límites del sistema y las voces legitimadas para intervenir.

Esta responsabilidad no equivale a exigir que una persona especialista resuelva por sí sola conflictos políticos. Supone hacer visibles los supuestos, advertir riesgos, comunicar incertidumbres y rechazar soluciones que trasladan daños previsibles. El Código de Ética de la Federación Mundial de Organizaciones de

Ingeniería (WFEO, 2023) vincula la práctica con el bienestar humano y la protección ambiental. Esa obligación se concreta mediante trazabilidad de decisiones, consulta temprana, monitoreo, mantenimiento y mecanismos de corrección.

Perú muestra con claridad esta dimensión. El Banco Mundial (2022) identifica oportunidades de descarbonización vinculadas con bosques, transporte, energía y minería, pero también una elevada vulnerabilidad frente a inundaciones, sequías, retroceso glaciar y variabilidad climática. Una obra resiliente no puede definirse solo por su resistencia física. Debe mantener servicios críticos, ser operable por las instituciones locales y evitar que la protección de un área incremente la exposición de otra.

1.1.3. Pensamiento sistémico, interdisciplinariedad y complejidad

Los sistemas socioambientales presentan retroalimentaciones, demoras y respuestas no lineales. Una política de eficiencia reduce el consumo unitario, baja costos y puede estimular el uso; una carretera mejora acceso y también acelera cambios de uso del suelo; el riego eleva productividad, pero puede consolidar cultivos incompatibles con la disponibilidad hídrica futura. El pensamiento sistémico permite representar estas cadenas y distinguir síntomas, causas estructurales y efectos diferidos.

La interdisciplinariedad resulta operativa cuando modifica la decisión. Incorporar ecología ayuda a reconocer umbrales y conectividad de hábitats; la economía permite evaluar costos de oportunidad y distribución; las ciencias sociales explican aceptación, conflicto y prácticas de uso; el derecho delimita obligaciones y derechos; los saberes locales revelan dinámicas territoriales que no aparecen en bases de datos agregadas. Reunir especialistas sin integrar sus criterios al diseño solo produce multidisciplinariedad aditiva.

La complejidad tampoco justifica la parálisis. Exige decisiones adaptativas: escenarios en lugar de un pronóstico único, soluciones modulares, márgenes de seguridad, indicadores tempranos y revisiones periódicas. El IPCC (2023) subraya que la resiliencia climática depende de integrar mitigación, adaptación y

desarrollo. Esa integración requiere evaluar rutas, no proyectos aislados. Dos alternativas con beneficios inmediatos similares pueden divergir si una bloquea durante décadas infraestructura intensiva en carbono y la otra conserva opciones futuras.

Una práctica sistémica reconoce además escalas. El balance ambiental positivo de una ciudad puede descansar en materiales, energía o alimentos extraídos en otros territorios. Xiao et al. (2024) demostraron que las interacciones entre los ODS atraviesan fronteras mediante comercio y flujos naturales. La unidad de análisis debe ampliarse hasta capturar los impactos relevantes, sin perder la precisión necesaria para actuar localmente.

1.2. Agenda 2030: avances, tensiones y responsabilidades

La Agenda 2030 convirtió una visión amplia del desarrollo en 17 objetivos y 169 metas. Su valor reside en reunir dimensiones sociales, ambientales, económicas e institucionales bajo un lenguaje común. Su limitación aparece cuando los objetivos se administran como listas independientes o cuando el reporte sustituye la transformación. La ingeniería puede acelerar varias metas, pero también crear bloqueos e impactos que los indicadores nacionales no muestran.

1.2.1. Balance mundial de los Objetivos de Desarrollo Sostenible

El balance mundial permanece lejos de la trayectoria acordada. Naciones Unidas (2025) informó que solo 35 % de las metas evaluables se encontraba en ruta o mostraba progreso moderado, mientras casi la mitad avanzaba de forma marginal o nula. La pandemia, los conflictos, el endeudamiento, la inflación, la fragmentación geopolítica y la intensificación de eventos climáticos redujeron capacidades públicas justamente cuando se requerían inversiones sostenidas.

Los promedios ocultan diferencias importantes. El acceso a electricidad, conectividad o agua puede mejorar a escala nacional y mantener brechas graves en áreas rurales, amazónicas, altoandinas o periferias urbanas. Una meta también puede avanzar en cantidad y retroceder en calidad: más conexiones no garantizan continuidad, asequibilidad, potabilidad ni capacidad de mantenimiento. Por eso, la evaluación debe desagregar por territorio, ingreso, género, edad, discapacidad y pertenencia étnica cuando los datos lo permitan.

América Latina y el Caribe enfrenta una recuperación débil y desigual. La CEPAL (2026) estima que, al ritmo observado, la región alcanzaría alrededor del 19 % de las metas en 2030. El rezago no se explica únicamente por falta de tecnología. Intervienen baja productividad, informalidad, desigualdad, espacio fiscal limitado, gobernanza fragmentada y dependencia de exportaciones primarias. En Perú, estas tensiones se expresan en la distancia entre la disponibilidad de recursos y la calidad efectiva de servicios, infraestructura y capacidades estatales en el territorio.

La Agenda conserva utilidad como mapa de compromisos, pero no debe confundirse con una teoría causal. Los iconos y alineamientos declarativos no demuestran contribución. Un proyecto aporta cuando identifica metas e indicadores pertinentes, establece una línea de base, documenta efectos directos e indirectos y prueba que los beneficios no se obtuvieron deteriorando otras dimensiones.

1.2.2. Interdependencias, sinergias y conflictos entre los ODS

Los ODS forman una red. Mejorar agua y saneamiento favorece salud, educación y productividad; ampliar energía limpia puede reducir contaminación del aire y emisiones; restaurar ecosistemas protege agua, biodiversidad y medios de vida. Las sinergias no son automáticas. Una expansión de biocombustibles puede competir por suelo y agua; una gran infraestructura renovable puede fragmentar hábitats o afectar derechos; la digitalización puede elevar demanda eléctrica y residuos electrónicos.

Xiao et al. (2024) cuantificaron interacciones transfronterizas entre 121 países y 768 pares de indicadores. Sus resultados muestran que comercio, finanzas, tecnología y flujos naturales conectan los avances de un país con efectos en otros. Los países de ingresos altos, aunque representaban una fracción menor de la población analizada, concentraban gran parte de las interacciones mundiales. Esta evidencia obliga a considerar huellas de consumo y cadenas de suministro, no solo emisiones o extracciones territoriales.

El análisis de sinergias debe distinguir correlación de causalidad. Dos indicadores pueden mejorar juntos debido al ingreso, una reforma institucional o una inversión común. Para decidir, se necesita una teoría de cambio que

explique mecanismos y distribuya efectos en el tiempo. También conviene identificar relaciones asimétricas: una meta puede beneficiar a otra, mientras la segunda no retroalimenta a la primera; o puede existir una ganancia inicial seguida de un costo diferido.

La ingeniería aporta modelos de redes, optimización multicriterio, análisis espacial y simulación, pero estas herramientas requieren límites normativos. No corresponde compensar cualquier pérdida ecológica con una ganancia monetaria. Algunos derechos, umbrales de seguridad y ecosistemas críticos deben operar como restricciones, no como variables intercambiables dentro de un puntaje agregado.

1.2.3. Contribución de la ingeniería al cumplimiento y evaluación de las metas

La contribución de la ingeniería abarca infraestructura de agua y saneamiento, energía, vivienda, movilidad, producción, gestión de residuos, observación ambiental y conectividad. Su impacto depende menos de etiquetar proyectos con ODS que de mejorar el desempeño verificable. Las metas 6.1 y 6.2, por ejemplo, exigen servicios seguros; construir redes sin fuente sostenible, tratamiento, operación y financiamiento de mantenimiento puede aumentar cobertura nominal sin consolidar el derecho.

La evaluación debería combinar indicadores de producto, resultado e impacto. Kilómetros de red, megavatios instalados o sensores desplegados describen productos. Continuidad del servicio, reducción de pérdidas, calidad del aire o tiempo de viaje reflejan resultados. Cambios en salud, vulnerabilidad o presión ecosistémica se aproximan al impacto, aunque su atribución sea más compleja. Datos abiertos, protocolos reproducibles y verificación independiente reducen el riesgo de seleccionar solo métricas favorables.

La infraestructura de datos también es una responsabilidad técnica. Naciones Unidas (2025) señala que las capacidades estadísticas son esenciales para identificar rezagos y orientar inversión. Sensores remotos, sistemas geoespaciales e inteligencia artificial pueden cubrir vacíos, siempre que se documenten incertidumbres, sesgos y protección de datos. Una precisión

aparente no corrige una muestra territorialmente sesgada ni reemplaza la validación en campo.

En Perú, el seguimiento debe dialogar con la diversidad geográfica y la descentralización. Un estándar nacional necesita adaptación a cuencas, ciudades costeras, Andes y Amazonía sin rebajar garantías. La ingeniería pública puede fortalecer esta territorialización mediante inventarios interoperables, mantenimiento basado en riesgo, asistencia técnica municipal y diseños que consideren capacidades reales de operación.

1.3. Crisis climática, biodiversidad y recursos naturales

Clima, biodiversidad y recursos no constituyen agendas paralelas. El cambio climático altera ecosistemas y agua; la degradación ecológica reduce regulación climática y protección frente a desastres; la extracción de materiales para infraestructura y transición energética crea nuevas presiones. Las respuestas aisladas corren el riesgo de resolver una variable mientras agravan otra.

1.3.1. Cambio climático, vulnerabilidad y riesgos sistémicos

El IPCC (2023) concluyó que la temperatura media global alcanzó aproximadamente 1,1 °C sobre el nivel de 1850–1900 durante 2011–2020. Cada incremento adicional intensifica peligros y pérdidas, mientras las opciones de adaptación se vuelven más costosas o menos eficaces. El riesgo surge de la interacción entre peligro, exposición y vulnerabilidad; no es una propiedad exclusiva del evento físico.

Los riesgos sistémicos atraviesan sectores. Una sequía reduce generación hidroeléctrica, eleva precios, restringe agua urbana y agrícola y presiona alimentos. Una inundación interrumpe carreteras, escuelas, centros de salud y cadenas logísticas. Cuando los sistemas están concentrados o carecen de redundancia, una falla local se propaga. La evaluación tradicional basada en registros históricos puede subestimar extremos bajo un clima cambiante.

El Banco Mundial (2022) caracteriza a Perú como altamente vulnerable y destaca exposición a inundaciones, sequías, deslizamientos, retroceso glaciar y variaciones asociadas a El Niño. La concentración de población e infraestructura en zonas costeras áridas agrega tensión hídrica, mientras comunidades andinas

y amazónicas enfrentan restricciones de acceso y capacidad institucional. Diseñar para el futuro exige escenarios climáticos, protección de cuencas, sistemas de alerta, redundancia y mantenimiento.

La adaptación puede ser maladaptativa si protege activos de alto valor desplazando agua o riesgo hacia poblaciones con menor influencia. También puede crear dependencia de energía, financiamiento o tecnología difícil de sostener. Una medida robusta reduce vulnerabilidad en varios escenarios, conserva flexibilidad y distribuye protección de manera justa. La mitigación debe acompañarla: adaptar indefinidamente sistemas que continúan elevando emisiones estrecha las posibilidades futuras.

1.3.2. Pérdida de biodiversidad y degradación de los ecosistemas

La biodiversidad sostiene polinización, fertilidad del suelo, regulación hídrica, alimentos, materiales y estabilidad ecológica. Su pérdida no se limita a la desaparición de especies emblemáticas. Incluye reducción de abundancia, diversidad genética, conectividad y funciones ecosistémicas. Richardson et al. (2023) sitúan la integridad de la biosfera entre los límites de mayor preocupación.

La Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas (IPBES, 2024) examina conjuntamente biodiversidad, agua, alimentos, salud y clima. Su evaluación muestra que las decisiones fragmentadas pueden producir costos cruzados y que las respuestas integradas generan beneficios más amplios. Esta conclusión es especialmente relevante para infraestructura, agricultura, energía y minería, cuyos impactos acumulativos suelen exceder la huella directa del proyecto.

Las evaluaciones ambientales centradas en un predio pueden ignorar corredores, cuencas y efectos acumulativos. Una carretera aparentemente pequeña puede inducir deforestación; varias captaciones autorizadas pueden superar el caudal ecológico; proyectos separados pueden fragmentar un hábitat hasta volverlo inviable. La jerarquía de mitigación exige evitar primero, minimizar después, restaurar cuando sea posible y compensar solo impactos residuales, sin asumir equivalencia perfecta entre ecosistemas.

Perú alberga una diversidad biológica excepcional en costa, Andes y Amazonía. Esa riqueza convive con deforestación, expansión agrícola, minería ilegal, contaminación y cambio climático. La ingeniería tiene tareas concretas: trazados que eviten áreas críticas, pasos de fauna, restauración hidrológica, control de sedimentos, monitoreo de largo plazo y diseño basado en ecosistemas. Las soluciones basadas en la naturaleza no eliminan la necesidad de infraestructura gris; pueden complementarla cuando se respetan procesos ecológicos y derechos territoriales.

1.3.3. Presión sobre el agua, el suelo, los minerales y otros recursos estratégicos

La transición energética aumenta la demanda de cobre, litio, níquel y otros minerales, mientras la urbanización mantiene un alto consumo de arena, cemento y acero. La Agencia Internacional de Energía (AIE, 2024) advierte que la concentración geográfica del suministro y refinación de minerales críticos crea riesgos para la seguridad de las cadenas. Diversificar, reciclar y reducir intensidad material son componentes de seguridad, no solo medidas ambientales.

El agua expone con claridad las interdependencias. Compiten abastecimiento humano, agricultura, energía, minería, industria y caudales ecológicos. La eficiencia parcelaria o industrial puede no liberar agua para la cuenca si el ahorro se utiliza para ampliar producción. Una evaluación responsable trabaja con balances hidrológicos, calidad, estacionalidad, derechos, retornos y escenarios climáticos, además del volumen captado.

El suelo se degrada por erosión, contaminación, sellado urbano, salinización y pérdida de materia orgánica. Sus ritmos de recuperación suelen ser mucho más lentos que los de ocupación. Diseñar ciudades compactas, estabilizar laderas, gestionar nutrientes y recuperar áreas degradadas evita costos futuros. Los minerales, aunque no desaparecen, pierden calidad funcional al dispersarse, mezclarse o terminar en residuos sin recuperación viable.

El PNUMA (2024) propone desacoplar bienestar y uso de recursos mediante suficiencia, circularidad y producción responsable. Para Perú, país minero y

megadiverso, el reto es doble: aprovechar oportunidades económicas sin normalizar pasivos, conflictos hídricos o dependencia primaria. La trazabilidad, el cierre financiado desde el inicio, la reutilización, el control de relaves y la participación territorial son condiciones de legitimidad.

1.4. Desigualdad, territorio y brechas de desarrollo

La sostenibilidad se decide en territorios concretos. Los beneficios de una obra pueden concentrarse en usuarios urbanos o sectores exportadores, mientras los costos recaen sobre comunidades de extracción, zonas de disposición o generaciones futuras. Medir únicamente el saldo agregado oculta quién gana, quién pierde y quién participa.

1.4.1. Distribución social y territorial de los beneficios y daños tecnológicos

La infraestructura distribuye oportunidades. Una red de transporte puede acortar tiempos para ciertos barrios y aumentar contaminación o desplazamiento en otros. La generación eléctrica beneficia al sistema nacional, pero sus impactos se localizan. Los centros de datos ofrecen servicios globales y concentran consumo de energía y agua. Estas asimetrías convierten el análisis distributivo en parte del desempeño técnico.

El ciclo de vida revela geografías ocultas: extracción, manufactura, operación y descarte rara vez ocurren en el mismo lugar. Xiao et al. (2024) muestran que las interacciones de sostenibilidad se transmiten a través del comercio. Una economía puede reducir impactos territoriales importando bienes intensivos en materiales, sin disminuir su huella de consumo. El desplazamiento no es progreso global.

La distribución también es temporal. Infraestructura barata de construir pero costosa de operar transfiere obligaciones a municipios y usuarios futuros. Los residuos persistentes y las emisiones acumulan riesgos durante décadas. Tasas de descuento elevadas pueden minimizar esos daños en los modelos, aunque no disminuyan físicamente. La evaluación debe transparentar cómo valora el tiempo y aplicar precaución frente a consecuencias irreversibles.

La participación mejora la información y la legitimidad cuando ocurre antes de que la solución esté cerrada. No consiste en socializar una decisión tomada. Comunidades campesinas, indígenas y urbanas poseen conocimiento sobre agua, movilidad, riesgos y prácticas de mantenimiento. Integrarlo exige tiempo, traducción intercultural, acceso a información y mecanismos para modificar o detener opciones.

1.4.2. Brechas de infraestructura, conectividad y capacidades productivas

Una brecha de infraestructura no equivale simplemente a falta de activos. Incluye calidad, continuidad, asequibilidad, accesibilidad, seguridad y mantenimiento. Construir más sin corregir fallas de gestión puede ampliar inventarios deteriorados. La prioridad debe ser el servicio: agua segura, movilidad efectiva, energía confiable y conectividad útil.

La brecha digital ilustra esta distinción. Cobertura móvil no garantiza dispositivos, habilidades, contenido pertinente ni conexión estable. Digitalizar trámites puede excluir a quienes carecen de acceso o alfabetización. Los sistemas deben mantener canales alternativos, accesibilidad universal y protección de datos. La tecnología fortalece capacidades cuando se acompaña de formación, soporte y gobernanza.

En América Latina, la heterogeneidad productiva separa empresas modernas de amplios segmentos informales con baja productividad. La CEPAL (2026) vincula el rezago de los ODS con estas restricciones estructurales. Infraestructura, innovación y formación deben articularse para evitar enclaves tecnológicos que importan equipos, conocimiento y mantenimiento sin desarrollar proveedores locales.

Perú enfrenta elevados costos logísticos, fragmentación territorial y capacidades subnacionales desiguales. El Banco Mundial (2022) sostiene que la resiliencia y descarbonización pueden elevar productividad si se coordinan transporte público, uso del suelo, gestión forestal, energía y adaptación. Esto requiere carteras de inversión, no proyectos inconexos, y presupuestos que cubran operación durante toda la vida útil.

1.4.3. Justicia climática, transición justa e inclusión

La justicia climática parte de una desigualdad básica: quienes menos contribuyeron históricamente a las emisiones suelen tener menor capacidad de protección y mayor exposición. El IPCC (2023) reconoce que las comunidades vulnerables, que han contribuido menos al cambio climático, resultan afectadas de forma desproporcionada. La respuesta debe atender responsabilidades, capacidades y distribución de pérdidas.

Una transición justa amplía la descarbonización más allá del reemplazo tecnológico. Considera empleo, ingresos, salud, territorio, género, identidad y acceso a energía. Cerrar una actividad contaminante puede mejorar el ambiente y, si se hace sin protección social ni diversificación productiva, profundizar pobreza. Mantenerla indefinidamente tampoco protege a trabajadores expuestos. La planificación temprana permite reconversión, diálogo y alternativas económicas.

Perú debe conciliar la demanda de minerales para tecnologías bajas en carbono con derechos, agua, biodiversidad y valor agregado nacional. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE, 2025) destaca la vulnerabilidad climática del país y la necesidad de fortalecer gestión del riesgo, capacidades locales y transición verde. La etiqueta “mineral crítico” no vuelve sostenible una operación; la legitimidad depende de estándares ambientales, fiscalización, beneficios territoriales y cierre responsable.

La inclusión debe incorporarse al diseño. Accesibilidad universal, seguridad para mujeres, tarifas asequibles, distribución de estaciones, horarios y mecanismos de queja cambian el uso real de un sistema. La equidad no es un complemento posterior: es una condición de eficacia, porque una solución que excluye a la población objetivo falla en su función.

1.5. Evaluación crítica de las soluciones de ingeniería

La evaluación crítica pregunta si una solución reduce el problema total, no solo el impacto visible en una etapa. Requiere límites de sistema explícitos, alternativas comparables, incertidumbre documentada y criterios distributivos. Ningún indicador único resume por sí solo la sostenibilidad.

1.5.1. Ciclo de vida, huellas ambientales y eficiencia de recursos

El análisis de ciclo de vida examina impactos desde la extracción de materias primas hasta producción, uso y fin de vida. Evita declarar “limpia” una tecnología porque no emite durante la operación. Los vehículos eléctricos, paneles solares o edificios eficientes incorporan materiales, energía, transporte y tratamiento final. Compararlos exige una unidad funcional coherente: pasajero-kilómetro, kilovatio-hora útil o servicio de climatización, no solo una unidad física.

Las huellas de carbono, agua y materiales facilitan comunicación, pero responden preguntas distintas. Una opción con menor carbono puede demandar más agua en una cuenca estresada; otra puede reducir materiales y usar sustancias tóxicas. La evaluación multicategoría previene el traslado entre impactos. También debe especificar geografía y momento: un metro cúbico de agua no tiene igual consecuencia en toda cuenca ni estación.

La calidad de datos determina la confianza del resultado. Inventarios genéricos pueden no representar la matriz eléctrica, transporte, mineralogía o prácticas de gestión de Perú. El análisis de sensibilidad debe probar vida útil, tasas de reciclaje, factores de capacidad y sustitución. Reportar un número sin rango puede transmitir una certeza inexistente.

La eficiencia es más útil cuando se vincula con metas absolutas. Reducir 20 % el material por unidad no disminuye el consumo total si la producción aumenta 40 %. El PNUMA (2024) combina eficiencia con suficiencia, circularidad y cambios en sistemas de provisión. La mejor alternativa puede ser rehabilitar, compartir o gestionar demanda antes de construir nueva capacidad.

1.5.2. Externalidades, efecto rebote y desplazamiento de impactos

Las externalidades son costos o beneficios que no recaen plenamente en quien decide. Contaminación, ruido, congestión, pérdida de paisaje y daños sanitarios pueden quedar fuera del precio. Valorarlos ayuda a comparar, pero algunos efectos no son reducibles de manera legítima a dinero. Los derechos y umbrales ecológicos deben mantenerse visibles.

Font Vivanco et al. (2022) revisaron el efecto rebote desde la ciencia de la sostenibilidad y mostraron que las ganancias de eficiencia pueden ser compensadas por cambios de consumo, precios, producción y estructura económica. El rebote directo ocurre cuando un servicio más barato se usa más; el indirecto, cuando el ahorro se destina a otros consumos; el sistémico aparece mediante transformaciones de mercado e infraestructura.

La economía circular no está exenta. Castro et al. (2022) explican que la reparación, reutilización o reciclaje pueden generar beneficios menores a los esperados si los productos secundarios no desplazan producción primaria, reducen precios o inducen más consumo. Cerrar un flujo material a escala de empresa no demuestra una reducción absoluta del impacto del sistema.

El desplazamiento puede ser espacial, temporal o entre categorías. Exportar residuos, importar materiales intensivos en emisiones, diferir el cierre de una mina o sustituir carbono por presión hídrica son ejemplos. La evaluación debe comprobar adicionalidad y sustitución real: qué actividad deja de ocurrir gracias a la solución, dónde y durante cuánto tiempo. Si no existe desplazamiento de la opción perjudicial, la innovación puede sumarse al consumo en vez de reemplazarlo.

1.5.3. Criterios ambientales, sociales, técnicos y económicos para la toma de decisiones

Una decisión sostenible comienza con alternativas amplias: no hacer, reducir demanda, reparar, soluciones basadas en naturaleza, opciones descentralizadas y nueva infraestructura. Comparar solo variantes de una obra predeterminada elimina decisiones cruciales. Los criterios ambientales incluyen emisiones absolutas, biodiversidad, agua, toxicidad, circularidad y reversibilidad; los sociales abarcan acceso, salud, empleo, derechos, participación y distribución.

Los criterios técnicos comprenden seguridad, confiabilidad, mantenibilidad, adaptabilidad, interoperabilidad y desempeño bajo escenarios extremos. Los económicos deben evaluar costos totales de propiedad, riesgos, externalidades y distribución del financiamiento. El menor costo inicial puede resultar más caro

si depende de repuestos inaccesibles, consume energía elevada o falla antes de lo previsto.

El análisis multicriterio hace explícitos conflictos, pero sus ponderaciones no son neutrales. Deben justificarse, someterse a sensibilidad y discutirse con actores afectados. Un promedio ponderado puede ocultar que una alternativa incumple un límite crítico. Conviene combinar umbrales excluyentes con puntuaciones para criterios compensables y presentar resultados desagregados.

La incertidumbre debe modificar la estrategia, no desaparecer en un anexo. Ante daños potencialmente graves e irreversibles, se justifican precaución, pilotos, modularidad y monitoreo. Las decisiones deben incluir responsables, indicadores, umbrales de corrección y recursos para actuar si el desempeño se desvía. Evaluar después de construir permite aprender; diseñar desde el inicio la posibilidad de corregir evita que el aprendizaje llegue demasiado tarde.

La sostenibilidad transforma la ingeniería porque amplía el objeto de diseño. Ya no basta con optimizar un artefacto: es necesario comprender el sistema de necesidades, recursos, instituciones, territorios y cadenas que lo vuelve posible. Los límites planetarios muestran que las mejoras relativas deben traducirse en reducciones absolutas de presión. La Agenda 2030 ofrece una arquitectura útil, pero sus metas interactúan y los avances pueden ocultar impactos transfronterizos o desigualdades internas.

La crisis climática, la pérdida de biodiversidad y la presión sobre recursos comparten causas y retroalimentaciones. Las respuestas requieren pensamiento sistémico, integración disciplinaria y participación efectiva. Perú representa un espacio especialmente ilustrativo: megadiversidad, exposición climática, urbanización costera, brechas territoriales y una economía minera vinculada con la transición global. Estas condiciones no conducen a rechazar la infraestructura o la innovación, sino a exigir decisiones más completas y responsables.

La evaluación crítica articula ciclo de vida, suficiencia, justicia, resiliencia y viabilidad. Una buena solución reduce el daño total, mejora el acceso, respeta límites y derechos, puede mantenerse con capacidades reales y conserva opciones frente a futuros inciertos. La ingeniería contribuye al desarrollo

sostenible cuando reconoce su poder de configurar sistemas y asume responsabilidad por los efectos previsibles de esa configuración



Capítulo II: Tecnologías e innovaciones para la transición sostenible

Tecnologías e innovaciones para la transición sostenible

La transición sostenible no depende de una tecnología aislada, sino de la capacidad de combinar infraestructura, conocimiento, regulación y operación con objetivos ambientales verificables. Una solución puede reducir emisiones durante el uso y, al mismo tiempo, trasladar impactos a la extracción de minerales, la fabricación, el consumo de agua o la gestión del final de vida. El análisis ingenieril exige, por ello, abandonar etiquetas absolutas como “limpia” o “cero emisiones” y trabajar con límites de sistema explícitos, indicadores comparables y condiciones territoriales concretas.

Este capítulo examina sistemas energéticos, tecnologías de agua y saneamiento, agricultura resiliente, producción industrial, materiales y herramientas digitales. La comparación distingue tecnologías consolidadas, opciones en expansión y propuestas todavía experimentales. Se consideran la madurez tecnológica, las emisiones de ciclo de vida, el consumo de recursos, los costos, la mantenibilidad, la infraestructura habilitante y la posibilidad de escalar sin ampliar desigualdades. El marco principal es internacional, con evidencia latinoamericana y referencias puntuales a Ecuador cuando existen datos verificables.

2.1. Sistemas energéticos bajos en carbono

La descarbonización del sistema energético comienza por reducir la demanda evitable, mejorar la eficiencia y sustituir progresivamente combustibles fósiles por electricidad y combustibles de bajas emisiones. El IPCC (2022) muestra que la intensidad de carbono de las tecnologías eléctricas debe evaluarse durante todo el ciclo de vida: construcción, suministro de materiales, operación, mantenimiento y desmantelamiento. Este criterio cambia la pregunta. No basta saber si una planta emite durante la generación; interesa cuánto emite por unidad de energía entregada, qué servicios de flexibilidad requiere y qué efectos ocasiona en suelo, agua, biodiversidad y comunidades.

2.1.1. Energías renovables y aprovechamiento sostenible de recursos energéticos

La energía solar fotovoltaica y la eólica terrestre son tecnologías comercialmente maduras, modulares y de despliegue relativamente rápido. IRENA (2024a) informó que el 81 % de la capacidad renovable incorporada en 2023 produjo electricidad a un costo inferior al de las nuevas alternativas fósiles comparables. El dato describe costos nivelados promedio y no reemplaza un análisis de sistema: la conexión, el respaldo, el almacenamiento, la congestión y la expansión de redes pueden modificar el costo final. La localización también importa. Un recurso excelente sin acceso a transmisión o con conflicto socioambiental no constituye por sí mismo un proyecto viable.

La hidroelectricidad aporta energía despachable, inercia y almacenamiento cuando incluye embalses, pero sus impactos dependen mucho del sitio. Cambios hidrológicos, sedimentación, fragmentación de ríos, emisiones de metano en ciertos reservorios tropicales y desplazamiento de población impiden tratarla como una categoría homogénea. En países andinos, una elevada participación hidroeléctrica reduce la intensidad media de la electricidad, aunque concentra riesgo climático. La crisis de suministro vivida por Ecuador durante sequías recientes ilustra la necesidad de diversificar fuentes, reforzar interconexiones, mantener capacidad firme y gestionar cuencas; no demuestra que la hidroelectricidad sea inadecuada, sino que una cartera poco diversificada resulta vulnerable.

La bioenergía presenta una variabilidad todavía mayor. El aprovechamiento de residuos agrícolas, estiércol, lodos o subproductos industriales puede evitar emisiones fugitivas y generar calor o biogás cerca del consumo. Los cultivos energéticos dedicados, en cambio, pueden competir por tierra y agua, inducir cambio de uso del suelo o deteriorar la biodiversidad. El balance debe incorporar origen de la biomasa, transporte, emisiones de óxido nitroso, permanencia del carbono y usos alternativos del residuo. Geotermia, energía marina y solar de concentración pueden ser valiosas en nichos territoriales, aunque requieren exploración, capital inicial y capacidades operativas que limitan su réplica automática.

Tabla 1.

Comparación cualitativa de opciones renovables

Tecnología	Madurez	Atributo operativo	Condición crítica
Solar fotovoltaica	Comercial	Modular; generación diurna variable	Red, suelo/techos y gestión de módulos
Eólica terrestre	Comercial	Alta productividad en buenos sitios	Medición del recurso, red y aceptación
Hidroeléctrica	Comercial	Puede aportar regulación y almacenamiento	Hidrología, sedimentos, ecosistemas y licencia social
Biogás de residuos	Comercial/en expansión	Energía gestionable y tratamiento de residuos	Suministro estable, fugas de metano y digestato
Geotermia	Comercial en sitios aptos	Generación firme	Riesgo exploratorio, reinyección y control de fluidos

2.1.2. Almacenamiento, hidrógeno de bajas emisiones y electrificación

La electrificación directa suele aprovechar mejor la electricidad que convertirla primero en otro vector. Bombas de calor, motores eléctricos y vehículos eléctricos eliminan combustión local y pueden reducir emisiones si la red se descarboniza. La infraestructura de carga, la capacidad de distribución, los perfiles de demanda y el acceso económico determinan el resultado. Electrificar una carga sin gestionar horarios puede aumentar picos y obligar a inversiones que una estrategia de respuesta de demanda habría evitado.

Las baterías de ion-litio están comercialmente consolidadas para regulación rápida, desplazamiento intradiario y respaldo de corta duración. IRENA (2025a) situó el costo instalado medio del almacenamiento a escala de red en 192 USD/kWh en 2024, con una reducción del 93 % respecto de 2010. Ese promedio no describe todos los proyectos ni incluye idénticas duraciones, química, conexión o condiciones financieras. La selección debe considerar ciclos, profundidad de descarga, temperatura, seguridad, disponibilidad de repuestos, degradación y ruta de reciclaje. Bombeo hidroeléctrico, almacenamiento térmico, aire comprimido y baterías de flujo cubren necesidades diferentes; comparar solo el costo por kilovatio-hora instalado oculta potencia, duración y vida útil.

El hidrógeno de bajas emisiones no es una fuente primaria, sino un portador producido a partir de energía y materia. La electrólisis alimentada con electricidad de baja intensidad de carbono puede ser pertinente para fertilizantes, refinación, acero reducido directamente y ciertos transportes difíciles de electrificar. Maniscalco et al. (2024) y Osman et al. (2024) advierten que el impacto climático depende sobre todo de la electricidad, la eficiencia del electrolizador, la compresión, el transporte y el uso final. La etiqueta “verde” no garantiza un desempeño uniforme. Usar electricidad marginal intensiva en carbono o construir proyectos en zonas con estrés hídrico puede deteriorar el balance.

América Latina posee recursos renovables favorables, pero la IEA (2021) subraya que el hidrógeno regional requiere demanda ancla, normas, infraestructura, financiación y coordinación. Exportar moléculas o derivados sin desarrollar usos productivos internos puede reproducir especialización primaria y trasladar riesgos territoriales. Para Ecuador, los proyectos deberían priorizar aplicaciones industriales justificadas y examinar agua, red, puertos, adicionalidad renovable y exposición comercial antes de plantear producción a gran escala.

2.1.3. Redes inteligentes, generación distribuida y comunidades energéticas

Una red inteligente combina medición, comunicaciones, automatización, pronóstico y control para operar flujos bidireccionales. La generación distribuida reduce distancias eléctricas y puede aumentar resiliencia, pero también produce sobretensiones, flujos inversos y necesidades de protección nuevas. Ohanu et al. (2024) señalan que la integración efectiva exige inversores con funciones de soporte, observabilidad de baja tensión, coordinación de recursos y estándares interoperables. El contador inteligente, aislado de tarifas, protección de datos y capacidad de respuesta, aporta información pero no garantiza eficiencia.

La IEA (2023a) identifica las redes como un posible cuello de botella de la transición: los plazos de planificación, permisos y construcción suelen ser mayores que los de plantas solares o eólicas. Digitalizar activos envejecidos sin renovar conductores, subestaciones y protecciones solo mejora la visibilidad de

una restricción física. La secuencia razonable combina mantenimiento, refuerzo selectivo, gestión de demanda, almacenamiento, automatización y expansión.

Las comunidades energéticas añaden una dimensión organizativa. Pueden compartir generación, administrar microrredes o distribuir beneficios, aunque su éxito depende de reglas de acceso, gobernanza, medición y reparto. LazaroIU et al. (2025) muestran que las definiciones y marcos regulatorios aún varían ampliamente. En comunidades rurales o amazónicas, una microrred renovable puede superar la extensión de red, siempre que exista un modelo local de operación, inventario de repuestos, formación y tarifa capaz de sostener el servicio. Instalar equipos sin financiar el mantenimiento convierte una innovación en activo varado.

2.2. Ingeniería del agua, saneamiento y seguridad alimentaria

La seguridad hídrica relaciona disponibilidad, calidad, acceso, riesgos y funcionamiento de los ecosistemas. UNESCO (2024) documenta que el agua sostiene producción, salud, energía y estabilidad social, mientras el cambio climático altera sequías, inundaciones y disponibilidad estacional. La respuesta ingenieril no se limita a aumentar oferta: debe reducir pérdidas, proteger fuentes, asignar caudales, gestionar demanda y preparar infraestructura para incertidumbre.

2.2.1. Gestión integrada, captación y uso eficiente del agua

La gestión integrada de recursos hídricos organiza decisiones a escala de cuenca, donde interactúan consumo humano, agricultura, industria, energía y ecosistemas. Sensores, telemetría, modelos hidrológicos y observación satelital mejoran la información, pero no sustituyen reglas de asignación ni participación. Un modelo preciso alimentado con datos incompletos puede producir una apariencia engañosa de certeza. Las redes de monitoreo deben diseñarse alrededor de decisiones concretas: alerta, distribución, control de extracciones o evaluación de calidad.

La captación de lluvia es una tecnología madura y de baja complejidad para usos domésticos no potables, riego o reserva, siempre que se dimensionen superficie, precipitación, almacenamiento, primera descarga y tratamiento. Su desempeño

disminuye durante sequías prolongadas y exige limpieza de techos, canaletas y tanques. La recarga gestionada de acuíferos puede almacenar agua con pérdidas por evaporación menores que un embalse superficial, aunque requiere hidrogeología, control de contaminantes y seguimiento de niveles.

En abastecimiento urbano, la reducción de agua no contabilizada suele ofrecer beneficios antes de ampliar captación. Sectorización hidráulica, control de presión, detección acústica de fugas y medición permiten priorizar reparaciones. El valor no reside en acumular sensores, sino en cerrar el ciclo entre alarma, orden de trabajo y reparación verificada. En Ecuador, UN-Water (2026a) reporta para 2024 que el 70 % de la población utilizaba servicios de agua potable gestionados de forma segura. La cifra nacional oculta diferencias territoriales y refuerza la necesidad de invertir tanto en calidad y continuidad como en cobertura.

2.2.2. Tratamiento, reutilización y saneamiento sostenible

El tratamiento debe responder a la calidad del afluente, el uso del efluente y la capacidad del operador. Lodos activados y sus variantes están consolidados, pero demandan aireación, personal y manejo de lodos. Lagunas, humedales construidos y sistemas descentralizados usan menos equipos y pueden adaptarse a localidades pequeñas, aunque requieren terreno, control de cargas y mantenimiento. Membranas producen efluentes de alta calidad en espacios reducidos, a costa de energía, ensuciamiento, reposición y gestión de concentrados.

Los reactores anaerobios y biorreactores anaerobios de membrana buscan recuperar energía como biogás y reducir aireación. Huang et al. (2024) concluyen que los AnMBR son prometedores para reúso, pero el control del ensuciamiento, el metano disuelto y los costos todavía restringen la adopción amplia. Silva (2023) encuentra que la reutilización puede aliviar presión sobre fuentes, aunque su sostenibilidad depende de calidad objetivo, distancia de transporte, energía, monitoreo y aceptación. Tratar toda el agua hasta calidad potable cuando el uso es riego o limpieza puede ser técnica y económicamente ineficiente.

La reutilización segura requiere barreras múltiples: control en la fuente, tratamiento acorde al riesgo, almacenamiento, restricciones de uso, vigilancia sanitaria y comunicación. La recuperación de fósforo, nitrógeno, calor y materia orgánica aproxima las plantas a instalaciones de recuperación de recursos. Kehrein et al. (2020) advierten que el potencial técnico no equivale a mercado: pureza, demanda, regulación y costo de separación condicionan los productos recuperados.

UN-Water (2024a) mostró que las estadísticas globales de tratamiento siguen incompletas y no siempre permiten calcular la fracción tratada de manera segura. Para Ecuador, el portal de datos de ODS 6 registró 49 % de población con saneamiento gestionado de forma segura en 2024, pero no publicó un valor nacional comparable para aguas residuales domésticas tratadas de manera segura. Esa ausencia debe declararse; completar el vacío con estimaciones mezclaría indicadores distintos.

2.2.3. Tecnologías para agricultura resiliente y producción alimentaria sostenible

La agricultura de precisión combina sensores de humedad, estaciones meteorológicas, imágenes, posicionamiento y control de maquinaria. Puede ajustar riego, fertilización y manejo fitosanitario a la variabilidad espacial, pero los beneficios dependen de calibración, conectividad, escala y capacidad de actuar sobre la recomendación. FAO (2022) señala que la automatización puede aumentar productividad y resiliencia, aunque el acceso desigual, la concentración de proveedores y la sustitución de trabajo exigen políticas inclusivas.

El riego por goteo reduce evaporación y aplica agua cerca de la raíz; no garantiza ahorro a escala de cuenca si el agricultor amplía superficie o cambia a cultivos más demandantes. Sensores de suelo y programación basada en evapotranspiración ayudan a controlar ese efecto, pero necesitan mantenimiento y validación local. Agricultura protegida, hidroponía y recirculación pueden elevar productividad por unidad de agua y suelo; también consumen materiales, energía y conocimiento técnico. Su pertinencia aumenta en cultivos de alto valor,

zonas con clima adverso o escasez severa, no necesariamente en toda explotación.

La resiliencia incluye diversidad genética, salud del suelo, agroforestería, cosecha de agua y pronóstico climático, no solo digitalización. La IA puede reconocer enfermedades o apoyar decisiones, pero los modelos entrenados con imágenes de otros cultivos, variedades o condiciones pueden fallar. FAO (2025) recomienda gobernanza de datos, infraestructura pública digital y desarrollo de capacidades para evitar que la herramienta aumente dependencia o excluya a productores pequeños.

2.3. Producción limpia, materiales y descarbonización industrial

La industria combina emisiones energéticas y de proceso. En cemento, acero y químicos, parte del carbono proviene de reacciones, no solo del combustible. El IPCC (2022) organiza la mitigación industrial alrededor de eficiencia material y energética, circularidad, electrificación, hidrógeno, materias primas alternativas y captura de carbono para emisiones residuales. La prioridad cambia por sector; una receta única pierde eficacia.

2.3.1. Eficiencia energética y reducción de emisiones en procesos industriales

La gestión energética basada en medición, balances y mejora continua es una opción madura. Motores eficientes, variadores de velocidad, aislamiento, control de combustión, recuperación de calor y optimización de vapor suelen reducir consumo con menor riesgo tecnológico que una sustitución total de proceso. La línea base debe corregirse por producción, mezcla de productos y clima; de otro modo, una caída de actividad puede confundirse con eficiencia.

La integración térmica aprovecha calor residual mediante intercambiadores, bombas de calor industriales o redes internas. Las temperaturas requeridas determinan si la electrificación directa es viable. Hornos de muy alta temperatura, acero primario y ciertas reacciones químicas necesitan tecnologías en expansión, como hidrógeno o electrificación avanzada. La captura, utilización y almacenamiento de carbono se encuentra comercialmente disponible en

aplicaciones específicas, pero añade consumo energético, infraestructura de transporte, monitoreo y responsabilidad de largo plazo. Debe reservarse para fuentes concentradas y emisiones difíciles de eliminar, después de evitar demanda y combustibles fósiles cuando sea posible.

En América Latina, la heterogeneidad industrial obliga a diferenciar grandes instalaciones de pequeñas y medianas empresas. Estas últimas pueden obtener mejoras con motores, refrigeración, mantenimiento y medición, pero afrontan restricciones de crédito y personal. Programas de auditoría acompañados de financiación y verificación convierten diagnósticos en inversiones. Un informe que enumera oportunidades sin asignar responsable, plazo y medición rara vez cambia la operación.

2.3.2. Biomateriales, materiales avanzados y sustitución de sustancias peligrosas

Los biomateriales pueden sustituir insumos fósiles o intensivos en carbono, aunque “biobasado” no significa biodegradable ni sostenible. El cultivo de materia prima puede usar tierra, agua, fertilizantes y energía; el procesamiento puede dominar el impacto. Residuos lignocelulósicos, fibras naturales, biocarbón y polímeros biobasados tienen oportunidades en construcción, empaques y compuestos cuando cumplen resistencia, durabilidad y seguridad. Una vida útil corta puede anular la ventaja inicial.

Los materiales avanzados —membranas selectivas, catalizadores, aleaciones ligeras, nanomateriales y materiales de cambio de fase— mejoran separaciones, eficiencia o almacenamiento. Su evaluación debe incluir síntesis, toxicidad, escasez, liberación durante uso y recuperabilidad. Sustituir una sustancia peligrosa por otra menos estudiada constituye una sustitución lamentable. El diseño seguro y sostenible compara función, peligro, exposición y ciclo de vida antes de escalar.

La construcción ofrece un campo decisivo. Reducir clínker mediante adiciones técnicamente compatibles, optimizar estructuras, prolongar vida útil y reutilizar componentes puede disminuir emisiones y extracción. La disponibilidad y calidad de adiciones varían por territorio; las normas, la trazabilidad y el desempeño a

largo plazo son tan importantes como el resultado de laboratorio. Materiales locales de baja huella requieren ensayos y control, no idealización.

2.3.3. Ecodiseño, manufactura sostenible y evaluación del ciclo de vida

El ecodiseño actúa antes de que el residuo exista. Reduce masa y diversidad material, facilita reparación, evita uniones irreversibles, estandariza piezas y prepara desmontaje. La manufactura aditiva puede disminuir desperdicio y fabricar geometrías eficientes, pero no siempre usa menos energía y puede dificultar reciclaje según material y acabado. La remanufactura conserva más valor incorporado que triturar un producto, siempre que exista logística inversa, diagnóstico y mercado.

La evaluación del ciclo de vida conforme a ISO 14040 e ISO 14044 estructura objetivo y alcance, inventario, evaluación de impactos e interpretación. Sus resultados dependen de unidad funcional, límites, asignación, mezcla eléctrica, calidad de datos y escenario de fin de vida. Dos estudios con unidades funcionales distintas no deben colocarse en una tabla como si fueran equivalentes. El análisis de costo del ciclo de vida y la evaluación social complementan, pero no se fusionan automáticamente con la LCA ambiental.

El PNUMA (2024) recuerda que la extracción mundial de recursos se triplicó en cinco décadas y continúa impulsando cambio climático, pérdida de biodiversidad y contaminación. La eficiencia por unidad de producto es insuficiente si el volumen total crece más rápido. La ingeniería sostenible debe observar efectos rebote, suficiencia y modelos de servicio, además de optimizar procesos.

2.4. Transformación digital al servicio de la sostenibilidad

La digitalización convierte mediciones en decisiones mediante conectividad, modelos y automatización. Su aporte ambiental es indirecto: aparece cuando una decisión reduce energía, agua, materiales, pérdidas o riesgos y esa reducción supera la huella del sistema digital. UNIDO (2025) identifica aplicaciones de IA, IoT y analítica a lo largo del ciclo del producto, desde extracción hasta logística inversa. La trazabilidad mejora la circularidad solo si los datos son fiables, interoperables y usados por actores capaces de actuar.

2.4.1. Inteligencia artificial y sistemas de apoyo a decisiones

La IA puede pronosticar demanda y generación, detectar anomalías, optimizar rutas, clasificar residuos y apoyar riego. Los modelos de aprendizaje automático capturan relaciones complejas, pero pueden degradarse cuando cambian equipos, clima, población o prácticas. La validación debe separar entrenamiento y prueba, comparar con una línea base sencilla y medir errores relevantes para la decisión. Una mejora estadística pequeña no justifica un sistema opaco si el error crítico continúa sin control.

Los sistemas de apoyo a decisiones combinan datos, modelos físicos, reglas y conocimiento humano. En energía y agua, la optimización multiobjetivo permite representar costo, emisiones, confiabilidad y equidad, aunque la ponderación es una decisión normativa. Presentar una única “solución óptima” puede ocultar quién recibe beneficios y riesgos. La explicación de supuestos, intervalos de incertidumbre y escenarios es parte del producto técnico.

La IA también consume electricidad y agua a través de centros de datos. La IEA (2025a) proyectó que el consumo eléctrico mundial de centros de datos podría aproximarse a 945 TWh en 2030, casi el doble del nivel de 2024, en su escenario base. Es una proyección, no un resultado inevitable; depende de eficiencia, demanda, chips y localización. Evaluar IA para sostenibilidad exige comparar el impacto operativo evitado con entrenamiento, inferencia, almacenamiento, redes y renovación de hardware.

2.4.2. Internet de las cosas, sensores y monitoreo ambiental

IoT enlaza sensores, comunicaciones, plataformas y actuadores. En agua detecta fugas o calidad; en agricultura mide humedad y microclima; en industria observa vibración, temperatura y consumo; en redes eléctricas aporta estado y respuesta. Un despliegue robusto empieza con la variable de decisión, no con el dispositivo. Precisión, deriva, frecuencia, ubicación, autonomía, cobertura, calibración y resistencia ambiental determinan la utilidad.

La arquitectura puede procesar datos en el borde para reducir latencia, tráfico y exposición, mientras la nube facilita análisis a escala. Protocolos abiertos y modelos de datos interoperables reducen dependencia de proveedor. Las redes

de bajo consumo amplían autonomía, aunque ofrecen menor ancho de banda. El diseño debe incluir fallos de comunicación y datos faltantes: una alarma crítica no puede depender de conectividad perfecta.

El monitoreo ambiental participativo puede ampliar cobertura y legitimidad, pero los sensores de bajo costo necesitan cotejo con instrumentos de referencia. Datos abundantes de calidad desconocida no equivalen a evidencia. La cadena de custodia digital, metadatos, aseguramiento de calidad y mantenimiento deben presupuestarse desde el inicio.

2.4.3. Gemelos digitales, automatización y mantenimiento predictivo

Un gemelo digital vincula un activo o proceso físico con una representación actualizada mediante datos. Se diferencia de una simulación estática por la conexión sostenida y, en versiones avanzadas, por la retroalimentación bidireccional. Puede ensayar escenarios, estimar estados no medidos y anticipar fallos. Abd Wahab et al. (2024) encontraron crecimiento rápido de aplicaciones de gemelos digitales y mantenimiento predictivo, junto con falta de estandarización y validación industrial amplia.

El mantenimiento predictivo usa señales de condición para estimar anomalías o vida remanente. Su valor depende de fallas registradas, etiquetado, criticidad y capacidad de intervención. En equipos con pocos fallos, el modelo puede aprender la normalidad, pero no predecir modos raros. Modelos híbridos que combinan física y datos suelen ser más interpretables, aunque exigen conocimiento y calibración. La automatización debe mantener límites seguros, registro de decisiones y posibilidad de operación manual degradada.

Los gemelos digitales completos están en expansión y, para muchas pymes o servicios municipales, aún pueden ser desproporcionados. Una jerarquía prudente comienza con instrumentación confiable, historiador de datos, tableros y mantenimiento basado en condición; agrega modelos complejos cuando el valor y la calidad de datos lo justifican. Digitalizar un proceso inestable puede acelerar decisiones equivocadas.

2.5. Límites y riesgos de las tecnologías emergentes

2.5.1. Consumo energético, materiales críticos y residuos tecnológicos

Paneles, turbinas, baterías, electrolizadores, redes y centros de datos requieren cobre, aluminio, litio, níquel, grafito, tierras raras y otros materiales. La IEA (2021b) mostró que las tecnologías de energía limpia suelen ser más intensivas en minerales que sus equivalentes fósiles durante la construcción, aunque evitan un flujo continuo de combustible. La comparación debe abarcar concentración geográfica, impactos mineros, derechos laborales, agua, refinación y reciclaje.

La circularidad reduce demanda primaria mediante durabilidad, reparación, segunda vida, recuperación y sustitución. No elimina la necesidad de minería durante una expansión rápida porque muchos materiales permanecen años en uso y los flujos de residuos llegan tarde. El diseño para desmontaje y la responsabilidad del productor mejoran tasas de recuperación. El PNUMA (2025) advirtió que los residuos electrónicos crecen cinco veces más rápido que el reciclaje formal desde 2010; la miniaturización y las mezclas complejas dificultan recuperar materiales.

Los indicadores deben evitar desplazar impactos. Un dispositivo que ahorra electricidad, pero se reemplaza cada dos años puede tener una huella material mayor que otro reparable. El costo total de propiedad debe incluir consumibles, conectividad, calibración, repuestos, actualización, retiro y tratamiento. En territorios alejados, disponibilidad y capacidad de reparación pueden pesar más que una eficiencia nominal ligeramente superior.

2.5.2. Ciberseguridad, privacidad, sesgos y dependencia tecnológica

La conexión de infraestructura crítica amplía la superficie de ataque. Redes eléctricas, plantas de agua y fábricas necesitan segmentación, autenticación, gestión de identidades, cifrado, copias de seguridad, actualización y respuesta a incidentes. La seguridad debe diseñarse desde la arquitectura y mantenerse durante la vida útil; un sensor abandonado con credenciales predeterminadas puede abrir una ruta hacia sistemas operacionales.

La privacidad aparece cuando medidores, cámaras, movilidad o agricultura recopilan información sobre hogares y productores. Minimización de datos, propósito explícito, retención limitada y control de acceso reducen riesgos. Anonimizar no siempre basta: patrones de consumo pueden permitir reidentificación. La gobernanza debe especificar propiedad, acceso, corrección, intercambio y eliminación.

Los sesgos surgen por cobertura desigual, etiquetas históricas, variables proxy y objetivos mal definidos. Un algoritmo entrenado en grandes explotaciones puede recomendar mal a pequeños productores; un modelo de fugas ajustado a redes instrumentadas puede relegar barrios sin sensores. Auditorías por subgrupo, participación local y mecanismos de apelación son controles técnicos y sociales. La dependencia tecnológica se reduce con estándares abiertos, portabilidad de datos, documentación, competencias internas y contratos que aseguren continuidad y salida.

2.5.3. Madurez tecnológica, escalabilidad y pertinencia territorial

La escala de madurez tecnológica —desde principios observados hasta sistemas comerciales— ayuda a ordenar incertidumbre, pero no mide sostenibilidad, mercado ni aceptación. Un prototipo con alto rendimiento en laboratorio puede usar materiales escasos, condiciones controladas o mantenimiento inviable. Las pruebas piloto deben declarar duración, entorno, comparación de referencia, fallas y costos; escalar por multiplicación simple ignora cadenas de suministro, personal, permisos e integración.

La pertinencia territorial combina recurso, demanda, infraestructura, capacidad institucional, conocimiento local, riesgo climático y distribución de beneficios. Una planta de membranas avanzada puede ser adecuada para una industria con personal y alta exigencia de calidad, pero frágil para una comunidad sin repuestos. Una solución basada en naturaleza puede ofrecer co-beneficios y menor energía, aunque requiere suelo y tiempo. La decisión correcta no siempre es la opción más novedosa.

Tabla 2.

Filtro de decisión para seleccionar y escalar tecnologías

Dimensión	Pregunta de control	Evidencia mínima
Desempeño	¿Supera una referencia bajo condiciones comparables?	Prueba independiente, unidad funcional y rango de incertidumbre
Ambiental	¿Dónde se desplazan los impactos?	Ciclo de vida, agua, materiales y fin de vida
Operación	¿Quién mantendrá el sistema y con qué repuestos?	Plan, competencias, tiempos de respuesta y presupuesto
Escala	¿Qué cambia al pasar de piloto a despliegue?	Suministro, red, permisos, logística y demanda
Territorio	¿Es compatible con recursos, instituciones y prioridades locales?	Consulta, análisis de riesgos y distribución de beneficios
Digital	¿Puede operar de forma segura y degradada?	Ciberseguridad, privacidad, interoperabilidad y respaldo

Las tecnologías consolidadas ofrecen el mayor potencial inmediato cuando se implementan como sistemas: eficiencia con medición, renovables con redes, saneamiento con operación, riego con gobernanza y sensores con capacidad de respuesta. Las opciones en expansión —almacenamiento de mayor duración, hidrógeno para usos difíciles, recuperación de recursos, gemelos digitales— necesitan selección cuidadosa y pilotos orientados a decisiones. Las propuestas experimentales merecen investigación, pero no deben sostener metas públicas sin evidencia de desempeño, costo y escalabilidad.

La transición sostenible requiere una cartera adaptativa. Primero se evitan demandas e impactos innecesarios; después se mejora eficiencia y circularidad; luego se sustituyen tecnologías y combustibles; finalmente se gestionan emisiones o residuos difíciles. Esta secuencia no es rígida, pero evita que una innovación costosa desplace medidas maduras. La evaluación debe actualizarse a medida que cambian la red eléctrica, los precios, los materiales y el clima.

Para América Latina, el potencial renovable, la biodiversidad y los recursos productivos conviven con desigualdad, brechas de infraestructura y dependencia tecnológica. El reto no es copiar rutas externas, sino desarrollar capacidades, estándares y cadenas de valor compatibles con cada territorio. Ecuador puede diversificar un sistema eléctrico con fuerte base hidroeléctrica, mejorar agua y saneamiento, digitalizar sectores productivos y aprovechar residuos; cada

avance necesita mantenimiento, datos públicos y aprendizaje institucional. La innovación se vuelve sostenible cuando el desempeño técnico permanece unido a la justicia territorial y a la responsabilidad durante todo el ciclo de vida.



Capítulo III: Soluciones territoriales, infraestructura y economía circular

Soluciones territoriales, infraestructura y economía circular

La sostenibilidad territorial no se resuelve acumulando obras “verdes” ni importando tecnologías diseñadas para climas, capacidades fiscales y formas de urbanización distintas. Una carretera, una red de agua, una vivienda o un sistema de transporte son sostenibles cuando prestan un servicio seguro y asequible durante su vida útil, soportan perturbaciones previsibles, reducen presiones ambientales y pueden ser operados y reparados por las instituciones y comunidades que dependen de ellos. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2022a) advierte que la exposición urbana crece con rapidez donde coinciden expansión informal, servicios insuficientes y baja capacidad de adaptación. En América Latina, ese cruce aparece tanto en periferias metropolitanas como en ciudades intermedias y poblados rurales conectados por redes frágiles.

El territorio obliga a mirar relaciones que suelen separarse en los proyectos. La vivienda depende del suelo y del transporte; el transporte, de la energía y del drenaje; el drenaje, de la cuenca; y la continuidad del agua potable, de ecosistemas, captaciones, plantas, redes, personal, repuestos y financiamiento. El IPCC (2022b) sostiene que los riesgos en Centro y Sudamérica son compuestos: calor, sequías, inundaciones, deslizamientos, incendios, pérdida de biodiversidad y desigualdad interactúan con infraestructura deficiente y gobernanza fragmentada. Diseñar un componente sin examinar el sistema puede trasladar el riesgo a otro barrio, sector o generación.

El capítulo analiza infraestructura, urbanización, movilidad, edificaciones, circularidad y soluciones basadas en la naturaleza desde una perspectiva de ciclo de vida. Perú constituye el referente territorial principal por la diversidad de costa, Andes y Amazonía y por el origen del libro; las experiencias de otros países latinoamericanos se emplean como contraste, no como modelos para copiar. Los casos se presentan con cautela: una intervención piloto o una simulación no equivale a un impacto probado, y una política aprobada no demuestra por sí sola que sus metas se hayan alcanzado.

3.1. Infraestructura sostenible y resiliente

La infraestructura resiliente conserva o recupera funciones críticas frente a amenazas, pero no debe confundirse con una obra indestructible. El Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2025a) define la resiliencia como una capacidad adaptativa que combina anticipación, absorción, recuperación y aprendizaje. Esto desplaza la evaluación desde la resistencia física aislada hacia el servicio: cuánto tiempo permanece disponible, quién queda desconectado, qué alternativas existen y qué costo social produce la interrupción. Una escuela que funciona como refugio, un centro de salud con energía de respaldo o un camino rural con rutas alternativas adquieren valor por la continuidad que proporcionan, no únicamente por la robustez de sus materiales.

3.1.1. Planificación, diseño y construcción con criterios climáticos

El diseño climático empieza antes del cálculo estructural. Requiere localizar activos fuera de zonas de amenaza cuando sea viable, proyectar la evolución de lluvias, temperaturas, caudales y nivel del mar, y reconocer incertidumbres. El IPCC (2022a) recomienda decisiones flexibles y secuenciales cuando el clima futuro no puede representarse con una única cifra. Elevar una cota, reservar suelo para ampliar un drenaje, modular una planta o evitar ocupaciones en llanuras de inundación permite ajustar el sistema sin reconstruirlo por completo.

La selección de materiales también debe evaluarse en ciclo de vida. Reducir carbono incorporado mediante cementos adicionados, madera legal y durable, áridos reciclados o componentes reutilizables solo es conveniente si se verifican desempeño, disponibilidad, trazabilidad, exposición ambiental y capacidades de control. Una alternativa de baja emisión que exige transporte largo, repuestos exclusivos o mantenimiento inexistente puede perder su ventaja inicial. El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2022) señala que la descarbonización del entorno construido requiere actuar sobre materiales, diseño, operación y renovación; contabilizar residuos al final de obra es insuficiente.

En Perú, la diversidad territorial impide una norma aplicada de manera mecánica. La costa árida afronta escasez de agua, salinidad, huaicos e inundaciones asociadas a El Niño; los Andes combinan sismicidad, heladas, movimientos en masa y gran dispersión; la Amazonía suma humedad, inundación, erosión fluvial y limitaciones logísticas. El Banco Mundial (2022a) identifica el cambio climático como una amenaza para logros de desarrollo peruanos y destaca que el transporte incrementa rápidamente sus emisiones. La lectura conjunta de amenaza, vulnerabilidad social y función de red debe guiar la priorización.

3.1.2. Adaptación y rehabilitación de infraestructura existente

La mayor parte de la infraestructura que prestará servicios en las próximas décadas ya está construida. Rehabilitarla exige inventario de activos, diagnóstico de deterioro, criticidad y exposición. La intervención puede incluir refuerzo estructural, protección de taludes, ampliación de drenajes, impermeabilización, sombreado, ventilación, sectorización de redes o sustitución de equipos ineficientes. La prioridad no siempre coincide con la obra más visible: un pequeño puente, una estación de bombeo o un transformador puede ser el punto cuya falla interrumpe toda la red.

El análisis de red resulta decisivo en caminos rurales. El diagnóstico climático del Banco Mundial (2022a) señala que las regiones amazónicas del Perú afrontan costos de transacción muy superiores a Lima y que adaptar carreteras es clave para la conectividad. Esto no autoriza a pavimentar sin evaluar deforestación inducida, conflictos territoriales y mantenimiento. En corredores de bajo tránsito, soluciones de drenaje, estabilización localizada, monitoreo comunitario y conservación rutinaria pueden ofrecer más continuidad por unidad de gasto que una ampliación sobredimensionada.

La rehabilitación debe evitar la maladaptación. Construir defensas rígidas puede proteger un tramo y acelerar erosión aguas abajo; climatizar edificios sin eficiencia incrementa demanda eléctrica y exposición a apagones; elevar vías sin pasos hidráulicos suficientes puede represar agua sobre viviendas. El IPCC (2022a) insiste en evaluar efectos distributivos y trayectorias de largo plazo. Las decisiones deben documentar qué riesgo reducen, qué riesgo residual dejan y sobre quién recae.

3.1.3. Gestión, mantenimiento y continuidad de servicios esenciales

La sostenibilidad se pierde cuando el presupuesto financia activos pero no su conservación. Brichetti et al. (2021) estiman que cerrar brechas regionales requiere inversión considerable hasta 2030, pero la cifra de inversión no sustituye la calidad del gasto ni el mantenimiento. Inventarios actualizados, estándares de servicio, inspecciones programadas, disponibilidad de repuestos y responsabilidades claras suelen generar beneficios menos visibles que inaugurar obras, aunque son indispensables para preservar el servicio.

La continuidad requiere redundancia proporcional al riesgo. Hospitales, sistemas de agua, telecomunicaciones y movilidad de emergencia necesitan respaldo energético, almacenamiento, protocolos, comunicaciones alternativas y personal entrenado. La redundancia no implica duplicar todos los componentes: puede consistir en interconexiones, equipos móviles, acuerdos de ayuda mutua o reservas estratégicas. El BID (2025a) propone valorar la confiabilidad como resultado central y no como atributo accesorio del activo.

La gestión comunitaria es valiosa cuando existe autoridad real, formación y soporte técnico; no debe utilizarse para transferir a poblaciones pobres obligaciones que corresponden al Estado. En sistemas rurales de agua, por ejemplo, las juntas pueden operar y vigilar, pero requieren acompañamiento para calidad, cloración, tarifas, reparación mayor y protección de fuentes. La apropiación aparece cuando la población participa en decisiones y comprende costos y límites, no cuando aporta mano de obra a un diseño ajeno.

3.2. Ciudades, movilidad y hábitat sostenible

América Latina es una región altamente urbanizada y profundamente desigual. ONU-Hábitat (2022) señala que las ciudades pueden impulsar acción climática e inclusión, pero advierte que el futuro urbano no es uniforme: las ciudades pequeñas e intermedias también concentran crecimiento y necesidades de infraestructura. La forma urbana define distancias, costos de redes, exposición a amenazas y acceso cotidiano a oportunidades.

3.2.1. Ordenamiento territorial y crecimiento urbano compacto e inclusivo

La compacidad útil no equivale a densificar cualquier suelo. Una ciudad compacta combina mezcla de usos, vivienda asequible, espacio público, transporte y servicios próximos. Densificar áreas expuestas, sin agua o sin equipamientos solo concentra vulnerabilidad. ONU-Hábitat (2024) relaciona la informalidad urbana con elevada exposición a desastres; por ello, el ordenamiento debe coordinar gestión del riesgo, suelo, vivienda y movilidad.

El control de expansión necesita alternativas habitacionales. Prohibir ocupaciones sin habilitar suelo seguro y asequible empuja a los hogares hacia mercados informales. La regularización, el mejoramiento integral de barrios, la prevención de nuevos asentamientos y el reasentamiento excepcional deben formar un continuo de política. El reasentamiento solo es defendible cuando el riesgo no puede mitigarse razonablemente y cuando conserva redes sociales, empleo, escuela y transporte.

Las ciudades amazónicas requieren una lectura hidrológica distinta de la retícula convencional. Rellenar humedales y quebradas para reproducir urbanizaciones de tierra firme reduce almacenamiento natural y eleva exposición. Huera-Lucero et al. (2020), al estudiar Puyo, Ecuador, propusieron integrar infraestructura verde en la planificación; su aporte es metodológico y no prueba impactos construidos. Para ciudades peruanas con clima y dinámica fluvial comparables, la transferencia exige cartografía local, derechos de suelo, régimen de lluvias y participación de comunidades ribereñas.

3.2.2. Movilidad sostenible, electrificación y transporte multimodal

La movilidad sostenible comienza reduciendo viajes forzados y priorizando accesibilidad. Un autobús eléctrico en congestión mantiene tiempos largos y demanda espacio vial; una ciclovía aislada no crea una red segura. Blanco et al. (2022) muestran, a partir de Bogotá, Buenos Aires y Ciudad de México, que la descarbonización del transporte necesita coordinación institucional, financiamiento y políticas integradas. Electrificar flotas es relevante, pero debe

acompañarse de prioridad vial, integración tarifaria, caminabilidad y control del crecimiento disperso.

La experiencia regional con autobuses eléctricos ofrece escala y cautelas. Calatayud et al. (2023) registraron 1.589 buses eléctricos en Colombia en 2023, 1.485 de ellos en Bogotá. El dato representa adopción de flota, no una evaluación completa de reducción de emisiones. El resultado depende de la matriz eléctrica, kilómetros recorridos, sustitución efectiva de buses diésel, ocupación, baterías y operación. La transferencia a ciudades peruanas debe examinar topografía, temperatura, autonomía real, depósitos, red eléctrica, contratos y formación técnica.

La equidad exige observar el viaje completo. Rivas et al. (2021) documentan que los modos activos tienen especial importancia para hogares de menores ingresos, aunque su exposición a siniestros, contaminación y violencia puede ser mayor. Aceras continuas, cruces accesibles, iluminación, sombra, estacionamiento para bicicletas e integración con transporte público suelen producir beneficios amplios con inversiones moderadas. No obstante, la reasignación de espacio vial genera conflicto distributivo y necesita participación, fiscalización y diseño universal.

El financiamiento operativo es tan importante como comprar vehículos. Rivas et al. (2025) reportan tiempos de viaje y espera mayores para usuarios del transporte público latinoamericano que en economías avanzadas, y una proporción mínima de vías metropolitanas dedicada exclusivamente al transporte colectivo o a bicicletas. Sistemas tarifarios, subsidios transparentes, recaudo, contratos de servicio y datos abiertos condicionan la calidad. Una flota moderna puede deteriorarse rápidamente bajo contratos que premian kilómetros sin calidad o sin fondos para mantenimiento.

3.2.3. Edificaciones eficientes, accesibles y saludables

Una edificación sostenible debe reducir demanda antes de añadir equipos. Orientación, protección solar, ventilación cruzada, aislamiento pertinente, iluminación natural y control de humedad disminuyen consumos y mejoran confort. Las estrategias varían: la ventilación abierta útil en climas cálidos puede agravar humo, ruido o humedad; una envolvente cerrada eficiente necesita

ventilación y mantenimiento. La salud incluye calidad del aire, agua segura, iluminación, acústica y seguridad térmica.

La accesibilidad tampoco es un complemento. Sandoval et al. (2022) muestran que las personas con discapacidad encuentran barreras en agua, energía y transporte en América Latina. Diseñar rutas continuas, pendientes adecuadas, señalización perceptible, baños accesibles y evacuación inclusiva desde el inicio cuesta menos que adaptar después. La consulta con usuarios permite detectar obstáculos que una revisión normativa no revela.

En vivienda social, la eficiencia debe medirse junto con asequibilidad, ubicación y posibilidad de ampliación segura. Una unidad barata en periferia puede aumentar gasto familiar en transporte y energía. Los sistemas constructivos industrializados pueden elevar calidad y velocidad, pero requieren cadenas de suministro, tolerancias, capacitación y repuestos. La innovación apropiada permite reparación local y adaptación sin comprometer estructura, ventilación o saneamiento.

3.3. Economía circular y gestión integral de recursos

La economía circular busca desacoplar bienestar de extracción y desperdicio mediante diseño, prevención y conservación de valor. La CEPAL (2021a) sostiene que puede contribuir a una recuperación productiva transformadora en América Latina; también advierte que las agendas regionales se concentran con frecuencia en residuos. El reciclaje es necesario, pero ocupa una posición tardía: cuando un producto llega mezclado, contaminado o inseparable, gran parte de su valor ya se perdió.

3.3.1. Prevención, reducción, reutilización, reparación y reciclaje

La jerarquía circular comienza evitando materiales y productos innecesarios. Después procura reducir, compartir, mantener, reparar, reacondicionar y reutilizar; reciclar es una opción posterior. Esta secuencia obliga a revisar compras públicas, garantías, disponibilidad de piezas y derecho a reparar. Los indicadores también cambian: toneladas recicladas pueden aumentar porque se generan más residuos, mientras que vida útil, intensidad material y tasa de reparación muestran conservación de valor.

En construcción, auditorías previas a demolición y diseño para desmontaje permiten recuperar componentes. La variabilidad de materiales, la falta de fichas y las responsabilidades legales limitan su uso estructural. Los pasaportes de materiales y bancos de componentes mejoran trazabilidad, aunque requieren estándares y demanda estable. El PNUMA (2022) subraya que la transformación del entorno construido necesita integrar las escalas de material, edificio y ciudad.

Los recicladores de base son actores productivos y ambientales. Formalizar no debe significar excluir mediante requisitos imposibles. Contratos municipales, pago por servicio, seguridad ocupacional, centros de clasificación y datos transparentes pueden reconocer su contribución. La automatización debe evaluarse por sus efectos laborales y por la composición real del residuo, no por su novedad.

3.3.2. Simbiosis industrial, logística inversa y cadenas circulares

La simbiosis industrial conecta flujos de empresas: calor residual, agua tratada, subproductos, envases o capacidad logística. Su viabilidad depende de volumen, calidad, distancia, sincronización, confidencialidad y responsabilidad. Un intercambio técnicamente posible puede fracasar si el flujo es irregular o el costo de acondicionamiento supera al material virgen. Ospina-Mateus et al. (2023) identifican barreras institucionales, tecnológicas y de información en la investigación latinoamericana sobre circularidad.

La logística inversa necesita responsabilidades claras desde el diseño. Sistemas de depósito y devolución, responsabilidad extendida del productor y contratos de retorno pueden recuperar envases, aparatos y baterías. En territorios rurales y amazónicos, los costos de retorno son altos; aprovechar rutas de abastecimiento, consolidar materiales y financiar almacenamiento seguro puede ser más eficaz que crear recorridos exclusivos.

La coordinación comercial resulta decisiva. Mulder (2021) explica que definiciones, estándares y reglas fronterizas afectan el movimiento de materiales secundarios en América Latina. La armonización debe impedir que la circularidad

se convierta en exportación de residuos peligrosos. Trazabilidad y capacidad de tratamiento son condiciones previas, no barreras burocráticas prescindibles.

3.3.3. Valorización de residuos, bioeconomía y nuevos modelos productivos

Valorizar no equivale a quemar o transformar cualquier residuo. Deben compararse prevención, uso material, recuperación biológica y energía según composición, emisiones y mercado. La digestión anaerobia puede producir biogás y digestato si existe separación de orgánicos y control de contaminantes. El compostaje descentralizado reduce transporte, pero necesita manejo de humedad, olores y uso seguro del producto.

La bioeconomía territorial puede aprovechar residuos agrícolas, forestales y pesqueros sin crear nuevas presiones. Extraer toda la biomasa remanente puede empobrecer suelos o desplazar usos comunitarios. Los modelos deben estimar disponibilidad sostenible, estacionalidad y trazabilidad. En Perú, la hoja de ruta de economía circular para pesca y acuicultura establece implementación y seguimiento sectorial; su aprobación crea un marco, pero los resultados deben evaluarse mediante indicadores públicos (Ministerio de la Producción, 2023).

Perú aprobó en 2020 una hoja de ruta para circularidad industrial y en 2025 actualizó el instrumento para industria manufacturera y comercio interno al 2030 (Ministerio de la Producción, 2020, 2025). La continuidad normativa es relevante, aunque el escalamiento depende de financiamiento, asistencia a pequeñas empresas, compras públicas, mercados secundarios y verificación. La Hoja de Ruta Nacional de Economía Circular al 2030 amplía la coordinación, pero convertir metas en cambios exige líneas base comparables y responsabilidades presupuestadas (Ministerio del Ambiente, 2025).

3.4. Soluciones basadas en la naturaleza y resiliencia ecosistémica

Las soluciones basadas en la naturaleza protegen, gestionan o restauran ecosistemas para responder a desafíos sociales y producir beneficios para biodiversidad. No son ornamentación ni reemplazan automáticamente infraestructura convencional. Oliver et al. (2021) muestran que pueden reducir

riesgos hídricos y costeros, pero su desempeño depende del sitio, el tiempo ecológico, el suelo y la gobernanza. Las soluciones híbridas suelen ser más realistas en ciudades consolidadas.

3.4.1. Infraestructura verde y azul para la adaptación climática

Parques inundables, humedales, corredores ribereños, jardines de lluvia, arbolado y pavimentos permeables pueden retener agua, moderar calor y mejorar hábitat. Su capacidad debe modelarse para eventos de diseño y mantenerse. Hojas bloqueadas, suelos compactados o conexiones incorrectas reducen el desempeño. Tsatsou et al. (2023) describen once tipos de soluciones basadas en naturaleza aplicables a sistemas urbanos circulares de agua, pero advierten que recuperación y reúso necesitan controles sanitarios.

El sistema pluvial Febres Cordero, en Guayaquil, ofrece un caso regional útil por su metodología. Quichimbo-Miguitama et al. (2022) simularon calles verdes y barriles de lluvia y encontraron potencial para reducir escorrentía bajo escenarios estudiados. Se trata de resultados de modelación, no de desempeño medido de obras. Para ciudades costeras peruanas, la adaptación requeriría recalibrar lluvias, suelos, pendientes, ocupación y mantenimiento, además de evaluar eventos asociados a El Niño.

El arbolado urbano debe priorizar cobertura donde el calor y la carencia de espacio verde son mayores. Plantar sin volumen de suelo, riego inicial o manejo de raíces produce mortalidad y conflictos con redes. La justicia distributiva es central: mejoras verdes pueden elevar valores del suelo y desplazar residentes si no se acompañan de protección habitacional. Wild et al. (2024) encontraron que autoridades latinoamericanas reconocen beneficios múltiples, pero enfrentan dificultades para valorar y financiar estas soluciones.

3.4.2. Restauración ecológica, control de inundaciones y protección costera

Restaurar riberas, humedales, manglares, dunas y arrecifes puede disipar energía, almacenar agua y reducir erosión. Paxton et al. (2024) concluyen que la evidencia de desempeño costero crece, aunque persisten vacíos sobre durabilidad, escalas y comparabilidad. La protección no es absoluta: una franja

degradada o estrecha puede ser superada. Debe comunicarse el riesgo residual y combinarse con alerta, zonificación y evacuación.

En cuencas andinas, recuperar bofedales, pastizales y zanjas de infiltración puede regular agua y sostener medios de vida, pero los efectos varían por suelo y clima. La experiencia de Adaptación basada en Ecosistemas de Montaña en Nor Yauyos-Cochas trabajó con comunidades y entidades públicas peruanas; las evaluaciones reportaron aprendizajes sobre restauración de pastizales, manejo de agua y gobernanza, aunque no todos los beneficios pudieron atribuirse con la misma certeza (GIZ, 2019). Su transferencia exige acuerdos de uso, monitoreo hidrológico y reconocimiento de derechos.

La inversión peruana en infraestructura natural para seguridad hídrica ha crecido mediante mecanismos que permiten a prestadores destinar recursos a ecosistemas de cabecera. El avance institucional es valioso, pero escalar no significa repetir una práctica en cualquier cuenca. Deben identificarse relación hidrológica, beneficiarios, costos de oportunidad, mantenimiento y distribución de beneficios. Las intervenciones grises siguen siendo necesarias para potabilización, almacenamiento o control de eventos extremos; el objetivo es diseñar carteras complementarias.

3.4.3. Integración de conocimientos científicos, locales y ancestrales

Los conocimientos locales y ancestrales son sistemas dinámicos vinculados con observación, práctica, instituciones y memoria territorial. Integrarlos no consiste en añadir testimonios decorativos. Requiere consentimiento, reconocimiento de autoría, protección de información sensible y capacidad de decisión. El IPCC (2022b) reconoce que el conocimiento indígena y local puede fortalecer adaptación, mientras advierte que la desigualdad y la pérdida territorial restringen su aporte.

Prácticas como amunas, gochas, andenes, manejo de bofedales o construcción adaptada a inundación deben evaluarse en su contexto. Su antigüedad no garantiza eficacia bajo cualquier escala y clima; tampoco autoriza a descartarlas por no provenir de ingeniería convencional. La validación puede combinar

monitoreo comunitario, mediciones hidrológicas, comparación de parcelas y memoria histórica. Los indicadores deben acordarse con quienes gestionan el territorio.

La coproducción modifica el proyecto. Técnicos aportan modelación, normas y evaluación; comunidades aportan conocimiento de ciclos, fallas, usos y conflictos. Cuando esa información cambia ubicación, operación o prioridades, la participación es sustantiva. Si solo confirma un diseño cerrado, se reduce a consulta. La apropiación depende de acuerdos sobre propiedad, datos, responsabilidades y beneficios.

3.5. Ingeniería para el Sur Global, América Latina y Perú

“Sur Global” no describe una condición homogénea. Reúne territorios con capacidades, desigualdades y legados distintos. La ingeniería pertinente reconoce restricciones fiscales, informalidad, dispersión, dependencia tecnológica y conocimientos situados sin convertirlas en déficit cultural. La pregunta no es qué tecnología es más avanzada, sino qué combinación mejora el servicio con riesgos y costos aceptables durante su ciclo de vida.

3.5.1. Transferencia tecnológica, innovación frugal y apropiación comunitaria

Transferir tecnología implica adaptar hardware, reglas, capacidades y financiamiento. Un sistema puede funcionar en un piloto subsidiado y fallar al terminar la asistencia. La evaluación debe incluir costo total, energía, conectividad, repuestos, propiedad de datos, ciberseguridad y posibilidad de reparación. Serebrisky et al. (2020) proponen infraestructura sostenible y digital para la recuperación regional, pero la digitalización necesita instituciones capaces de usar los datos y mantener sensores.

La innovación frugal busca desempeño suficiente con recursos limitados; no debe normalizar servicios de segunda categoría. Modularidad, materiales disponibles, interfaces abiertas y reparación local pueden reducir dependencia. El estándar de seguridad y dignidad sigue siendo exigente. Una planta compacta o un puente modular son apropiados cuando responden a demanda, amenazas y mantenimiento, no solo porque cuestan menos al inicio.

La apropiación comunitaria necesita opciones reales. Las comunidades deben conocer alternativas, costos, riesgos y responsabilidades. La formación de operadores y el acompañamiento posterior forman parte del proyecto. Indicadores de apropiación incluyen continuidad operativa, resolución de fallas, participación de mujeres y grupos históricamente excluidos, transparencia tarifaria y capacidad de modificar reglas.

3.5.2. Respuestas para territorios rurales, amazónicos, costeros e insulares

En territorios rurales dispersos, sistemas descentralizados de agua, energía y saneamiento pueden evitar redes extensas, pero demandan soporte técnico territorial. La estandarización de componentes y brigadas móviles facilita mantenimiento. Caminos de bajo volumen deben integrar drenaje, bioingeniería y vigilancia de puntos críticos. La conectividad digital puede apoyar telemedicina y educación, siempre que existan electricidad, equipos y capacidades.

La Amazonía exige proteger dinámicas fluviales y territorios indígenas. Infraestructura elevada o flotante puede adaptarse a inundaciones estacionales, mientras que carreteras y rellenos pueden alterar drenaje y acelerar ocupación. La evaluación ambiental debe considerar impactos indirectos y acumulativos. Transporte fluvial seguro, energía distribuida y saneamiento compatible con niveles freáticos pueden ser preferibles a replicar redes urbanas convencionales.

En la costa peruana, escasez de agua, expansión urbana y eventos extremos obligan a gestionar cuencas completas. Reúso seguro, reducción de fugas, recarga y protección de humedales pueden complementar nuevas fuentes. Desalinizar puede ser necesario en casos específicos, pero implica energía, salmuera, costo y capacidad operativa. En zonas insulares latinoamericanas, el límite de suelo vuelve prioritaria la prevención de residuos y la logística inversa; importar tecnologías sin salida para baterías y componentes crea pasivos.

3.5.3. Experiencias, aprendizajes y posibilidades de escalamiento en Perú

El escalamiento peruano debe partir de diversidad y no de una receta nacional única. El diagnóstico climático del Banco Mundial (2022a) propone fortalecer

resiliencia con un enfoque de gobierno completo. Esto requiere integrar inversión pública, ordenamiento, gestión del riesgo, ambiente, transporte y vivienda. Las metodologías pueden estandarizarse —evaluación de riesgo, costo de ciclo de vida, participación y monitoreo— mientras las soluciones se adaptan.

Tres experiencias ilustran posibilidades y límites. La hoja de ruta de economía circular crea continuidad regulatoria, pero necesita indicadores y apoyo a pequeñas empresas. Los mecanismos para infraestructura natural hídrica abren financiamiento, aunque exigen evidencia hidrológica y acuerdos justos. La adaptación de carreteras rurales protege conectividad, pero debe incorporar conservación y efectos territoriales indirectos. Ninguna experiencia puede calificarse de éxito general sin evaluaciones comparables de resultados y distribución.

Tabla 3.

Casos comprobables y condiciones de transferencia

Localización y periodo	Problema e intervención	Evidencia disponible	Limitaciones y condiciones de transferencia
Bogotá, Colombia; flota reportada en 2023	Contaminación y emisiones del transporte; incorporación de buses eléctricos	Registro regional de 1.485 buses en Bogotá	El tamaño de flota no demuestra reducción neta; verificar matriz eléctrica, sustitución, contratos, baterías y prioridad vial
Guayaquil, Ecuador; estudio publicado en 2022	Escorrentía urbana; simulación de calles verdes y barriles de lluvia	Modelación hidrológica del sistema Febres Cordero	No corresponde a desempeño medido; recalibrar lluvias, suelos, ocupación y mantenimiento
Nor Yauyos-Cochas, Perú; programa evaluado hasta 2019	Vulnerabilidad hídrica y de pastizales; adaptación basada en ecosistemas	Evaluación de prácticas, capacidades y gobernanza	Atribución desigual de resultados; requiere derechos claros, monitoreo y acuerdos comunitarios
Perú; 2020–2030	Producción lineal; hojas de ruta sectoriales y nacional de economía circular	Normas y metas oficiales	Política aprobada no equivale a implementación; exige líneas base, presupuesto, trazabilidad y evaluación
Puyo, Ecuador; estudio publicado en 2020	Expansión urbana y fragmentación ecológica; propuesta de infraestructura verde	Diagnóstico espacial y propuesta de planificación	Propuesta, no impacto construido; transferir solo metodología con datos locales

Para escalar conviene emplear etapas. Primero se prueba pertinencia y seguridad en condiciones representativas; después se evalúan resultados, costos y distribución; luego se estandarizan componentes compatibles con adaptación local; finalmente se asegura financiamiento operativo y aprendizaje. El monitoreo debe continuar después de la inauguración y publicar fallas. Escalar una capacidad —diagnosticar drenajes, mantener sistemas, contratar servicios— suele ser más durable que multiplicar un artefacto.

La infraestructura sostenible es una relación entre territorio, activo, servicio e institución. El diseño climático reduce riesgo cuando incorpora incertidumbre, flexibilidad y efectos distributivos. Rehabilitar y mantener puede ser más rentable que construir, pero exige inventarios, presupuestos y rendición de cuentas. La continuidad de servicios esenciales constituye el indicador práctico de resiliencia.

Las ciudades compactas solo son sostenibles si combinan vivienda asequible, acceso y suelo seguro. La movilidad requiere priorizar proximidad, transporte público y modos activos antes de sustituir motores. Las edificaciones eficientes deben ser saludables, accesibles y reparables. Estas decisiones se refuerzan: una vivienda bien ubicada reduce viajes; un barrio permeable reduce carga de drenaje; un edificio pasivo reduce presión energética.

La economía circular conserva valor antes de gestionar residuos. Prevención, reparación, logística inversa y simbiosis necesitan reglas, mercados y trazabilidad. La circularidad no debe desplazar costos hacia recicladores, periferias o países receptores. Las soluciones basadas en la naturaleza agregan regulación hídrica, protección y biodiversidad, pero requieren espacio, tiempo ecológico, mantenimiento y evaluación del riesgo residual.

Para Perú y América Latina, transferir supone traducir, no copiar. Una solución escalable ofrece desempeño comprobable, componentes mantenibles, financiamiento de ciclo de vida, gobernanza legítima y posibilidad de ajuste. La ingeniería gana pertinencia cuando hace visibles las limitaciones y distribuye capacidad de decisión. El resultado buscado no es un territorio lleno de tecnologías, sino sistemas que sostienen vida, servicios y ecosistemas bajo condiciones cambiantes.



Capítulo IV: Gobernanza, ética y futuro de la ingeniería sostenible

Gobernanza, ética y futuro de la ingeniería sostenible

Las soluciones examinadas en los capítulos anteriores —energía limpia, infraestructura resiliente, gestión circular de materiales, digitalización y tecnologías aplicadas al agua, la producción y las ciudades— comparten una dificultad que suele subestimarse: su desempeño no depende únicamente de que el diseño funcione en condiciones de laboratorio o de que el equipo pueda construirse. Una tecnología técnicamente madura puede quedar detenida por una distribución confusa de competencias, una regulación incoherente, un contrato que premia el menor costo inicial, un modelo financiero que ignora el mantenimiento o una relación deteriorada con la comunidad. También puede operar y, aun así, trasladar riesgos a trabajadores, mujeres, pueblos indígenas, barrios periféricos o generaciones futuras. La ingeniería sostenible comienza con la calidad técnica, pero solo se consolida cuando instituciones, financiamiento, derechos y capacidades profesionales sostienen el servicio durante todo su ciclo de vida.

La gobernanza tecnológica designa ese entramado de decisiones, reglas, actores y mecanismos de aprendizaje. No equivale a gobierno ni a una oficina coordinadora. Incluye ministerios, gobiernos regionales y locales, reguladores, universidades, empresas, colegios profesionales, organizaciones sociales, entidades financieras y comunidades que producen conocimiento y soportan consecuencias distintas. La UNESCO (2021a) observa que el avance científico no se traduce automáticamente en desarrollo si las políticas de ciencia, tecnología e innovación permanecen separadas de las prioridades sociales. La OCDE (2023) añade que la innovación orientada a misiones requiere capacidades para anticipar, experimentar y corregir, además de mecanismos que conecten decisiones de diferentes sectores y niveles territoriales.

El capítulo adopta una mirada peruana con apertura latinoamericana. Perú ofrece un escenario relevante por la coexistencia de fuertes brechas territoriales, exposición climática, economías extractivas, ciudades en expansión y una creciente demanda de infraestructura y servicios. No se pretende convertir cada argumento en una comparación nacional ni trasladar mecánicamente

experiencias externas. El interés está en identificar condiciones que permitan adaptar instrumentos a la diversidad institucional y ecológica de la región.

La discusión se organiza en cinco bloques. El primero aborda políticas públicas, regulación, contratación y participación. El segundo diferencia fuentes de financiamiento y examina su viabilidad. El tercero integra la ética en decisiones concretas de diseño, seguridad, datos y distribución de riesgos. El cuarto propone una arquitectura de medición y aprendizaje. El quinto estudia competencias y escenarios posteriores a 2030. Las proyecciones se presentan como escenarios probables, posibles o deseables, nunca como pronósticos cerrados

4.1. Políticas públicas y gobernanza de la innovación

4.1.1. Instituciones, planificación y coordinación multinivel

Las transiciones sostenibles atraviesan sectores que las administraciones públicas suelen gestionar por separado. Una planta solar puede depender de la política energética, el uso del suelo, la conexión a red, la gestión del agua, la consulta social, la formación laboral y las compras públicas. Si cada entidad optimiza su competencia sin una lectura sistémica, aparecen permisos incompatibles, inversiones duplicadas o infraestructuras sin operador. El problema no se resuelve reuniendo actores ocasionalmente; requiere mandato, información compartida, presupuesto y autoridad para decidir entre objetivos en tensión.

La gobernanza orientada a misiones ofrece una respuesta parcial. Mazzucato (2021) plantea que una misión pública debe formular un desafío social medible, movilizar múltiples sectores y admitir una cartera de proyectos con distintos niveles de riesgo. Su valor reside menos en escoger una tecnología ganadora que en construir una dirección común. La OCDE (2023) advierte, sin embargo, que la anticipación pierde utilidad cuando los ejercicios de futuro no inciden en presupuestos, normas o decisiones de inversión. La planificación debe enlazar diagnóstico, cartera, financiamiento, ejecución y evaluación; de otro modo, la estrategia se convierte en un documento sin capacidad transformadora.

En Perú, una arquitectura funcional podría partir de cuatro niveles. El nivel nacional fija objetivos, estándares mínimos, reglas fiscales y marcos de datos. Los gobiernos regionales traducen esas prioridades a sistemas productivos, cuencas y corredores territoriales. Los gobiernos locales articulan suelo, servicios y participación vecinal. Las organizaciones comunitarias y operadores aportan conocimiento de uso, mantenimiento y vulnerabilidad. Este reparto no elimina la responsabilidad sectorial; crea interfaces explícitas. Para cada programa conviene definir una entidad líder, responsables de resultados parciales, una secretaría técnica, reglas para resolver controversias y un repositorio de decisiones.

La coordinación también necesita continuidad. Los ciclos políticos son más breves que la vida de una red de agua, una carretera o un sistema de almacenamiento. Los acuerdos de largo plazo deben expresarse en carteras multianuales, presupuestos de operación y mantenimiento, estándares de interoperabilidad y mecanismos de transición entre autoridades. CEPAL (2022) ha insistido en que la transformación productiva y digital latinoamericana exige políticas integradas capaces de reducir brechas, no solo ampliar conectividad. La continuidad, por tanto, no significa inmovilizar decisiones: implica preservar objetivos públicos y trazabilidad mientras se ajustan instrumentos con nueva evidencia.

Una tecnología puede fracasar incluso con financiamiento inicial cuando no existe una organización responsable después de la inauguración. Por eso, la planificación debe exigir un “propietario del servicio”: la entidad que responde por disponibilidad, mantenimiento, reposición, datos y atención de fallas. El expediente técnico debe incluir capacidades humanas, repuestos, costos recurrentes y protocolos de contingencia. Este requisito cambia la pregunta de “¿puede construirse?” a “¿quién garantizará el servicio, con qué recursos y bajo qué estándar?”.

4.1.2. Regulación, normalización técnica y contratación pública sostenible

La regulación sostenible cumple tres funciones: protege bienes públicos, reduce incertidumbre y crea señales para innovar. Una norma demasiado débil permite

externalizar daños; una norma prescriptiva y desactualizada puede bloquear soluciones mejores. El equilibrio se alcanza cuando la autoridad define resultados verificables —seguridad, emisiones, desempeño energético, accesibilidad o circularidad— y permite distintas rutas técnicas siempre que demuestren equivalencia.

Es necesario diferenciar instrumentos. Una ley o reglamento nacional es obligatorio dentro de su jurisdicción. Una norma ISO es, en principio, voluntaria; adquiere fuerza contractual o regulatoria cuando una norma jurídica, licencia o pliego la incorpora expresamente. ISO 14001 establece requisitos para sistemas de gestión ambiental; ISO 31000 ofrece directrices de gestión de riesgos y no es una norma certificable; ISO 26000 brinda orientación sobre responsabilidad social. Mencionarlas como si fueran leyes universales sería incorrecto. Su utilidad radica en proporcionar lenguajes y procesos comparables, pero su adopción no sustituye el cumplimiento legal ni demuestra por sí sola un buen resultado ambiental o social (International Organization for Standardization [ISO], 2018, 2020).

La contratación pública puede desplazar el mercado hacia soluciones sostenibles porque agrega demanda y reduce incertidumbre. La OCDE (2024) sostiene que la compra pública de innovación permite orientar recursos hacia retos sociales, aunque exige compradores con capacidad técnica, diálogo temprano con el mercado y gestión de riesgos. Un pliego centrado en el precio más bajo suele favorecer equipos baratos con alto consumo, poca reparabilidad o mantenimiento costoso. El análisis de costo del ciclo de vida incorpora adquisición, operación, energía, mantenimiento, fallas y disposición final. También puede valorar desempeño social, siempre que los criterios sean verificables, proporcionales y no restrinjan indebidamente la competencia.

La sostenibilidad no debe aparecer como una declaración genérica en las bases. Un contrato de alumbrado eficiente, por ejemplo, puede fijar niveles lumínicos, consumo máximo, disponibilidad, reposición de componentes, recuperación de luminarias y reporte de fallas. Un proyecto vial puede establecer resiliencia frente a eventos climáticos, seguridad de usuarios, emisiones de materiales y condiciones laborales. Los indicadores necesitan línea base, método de

medición, frecuencia, responsable y consecuencia contractual. Sin estos elementos, la cláusula verde queda expuesta a interpretaciones o a publicidad ambiental engañosa.

La normalización técnica también puede excluir. Requisitos costosos de certificación, experiencia o garantías afectan a pequeñas empresas, cooperativas e innovadores locales. La solución no es reducir seguridad, sino dividir contratos cuando sea viable, reconocer pruebas equivalentes, ofrecer instalaciones de ensayo, publicar planes de compra y usar procesos competitivos de innovación. La OCDE (2025) identifica transparencia, acceso, capacidad, evaluación, gestión de riesgos y rendición de cuentas entre los principios que deben funcionar de manera integrada en la compra pública.

Tabla 4.

Instrumentos públicos y su función en una transición tecnológica

Instrumento	Función principal	Ventaja	Riesgo de diseño	Condición mínima
Ley o reglamento	Fijar obligaciones y límites	Cobertura y exigibilidad	Rigidez o débil fiscalización	Competencia clara, evidencia y capacidad sancionadora
Norma técnica voluntaria	Homogeneizar métodos y lenguaje	Comparabilidad e interoperabilidad	Confundir certificación con desempeño real	Verificación, actualización y adaptación al contexto
Contratación sostenible	Crear demanda y premiar desempeño	Escala soluciones y ordena mercados	Criterios vagos o barreras para pymes	Costo de ciclo de vida, métricas y diálogo con mercado
Sandbox regulatorio	Probar bajo supervisión	Aprende antes de regular a escala	Experimentación sin protección suficiente	Alcance, plazo, salvaguardas y salida definida
Incentivo fiscal o financiero	Corregir costos y movilizar inversión	Acelera adopción	Subsidios regresivos o permanentes	Temporalidad, focalización y evaluación distributiva

Acuerdo
voluntario

Coordinar
compromisos
sectoriales

Flexibilidad

Baja rendición de
cuentas

Metas públicas,
verificación
independiente y
revisión

4.1.3. Participación ciudadana y gestión de conflictos sociotécnicos

Los conflictos tecnológicos rara vez se explican solo por falta de información. Una comunidad puede comprender los beneficios nacionales de una línea eléctrica y rechazar que sus costos territoriales se concentren localmente. Puede existir desacuerdo sobre quién define el problema, qué riesgos son aceptables, cómo se distribuye el valor o qué conocimientos cuentan como evidencia. Tratar la oposición como ignorancia impide reconocer conflictos legítimos de derechos, identidad, territorio y confianza.

La participación significativa comienza antes de cerrar alternativas. El Marco Ambiental y Social del Banco Mundial establece divulgación oportuna, consulta continua y mecanismos de quejas durante el ciclo del proyecto, con intensidad proporcional al riesgo (World Bank, 2017). Este marco rige proyectos financiados por el Banco bajo sus condiciones; no constituye automáticamente legislación nacional. Su aporte metodológico consiste en exigir identificación de actores, atención diferenciada a grupos vulnerables, registro de compromisos y respuesta a agravios.

Una arquitectura participativa robusta tiene al menos cinco momentos: mapeo de afectados e interesados; divulgación accesible de alternativas e incertidumbres; deliberación con capacidad de modificar el diseño; acuerdos sobre beneficios, mitigación y monitoreo; y mecanismos de reclamación con plazos y apelación. En territorios indígenas deben respetarse los derechos colectivos y los procedimientos aplicables, incluido el consentimiento libre, previo e informado cuando corresponda según el marco jurídico pertinente. La participación no reemplaza esos derechos ni debe usarse para legitimar una decisión tomada.

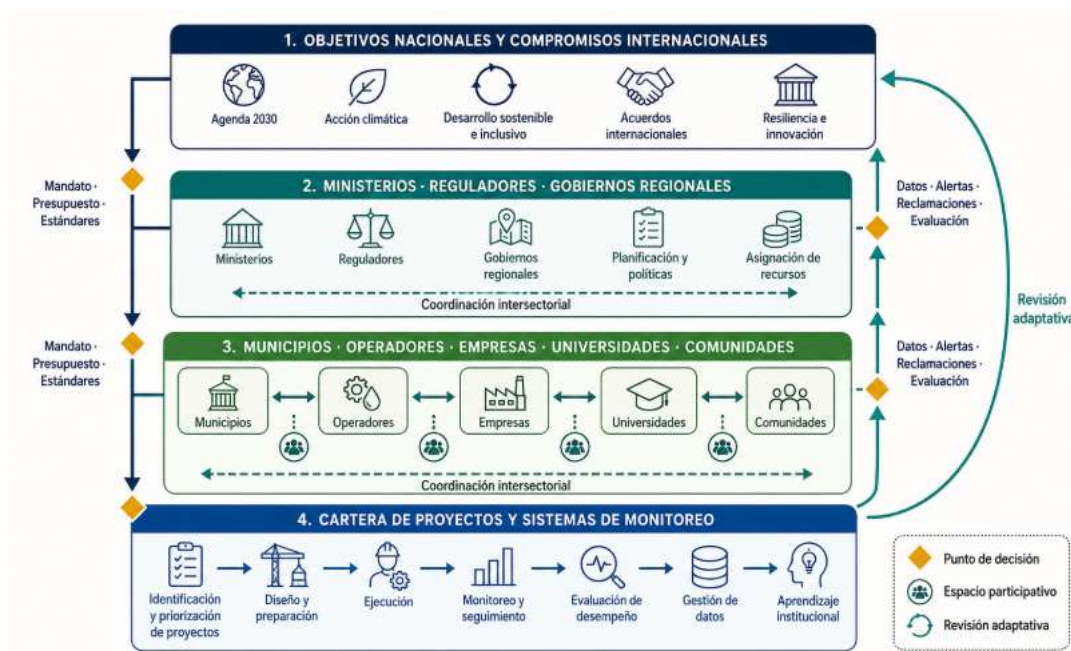
La gestión de conflictos necesita mediación y evidencia compartida. Los comités de monitoreo participativo pueden acordar qué medir, dónde ubicar sensores,

quién custodia los datos y cómo se activa una respuesta. La información técnica debe traducirse sin perder incertidumbre. Una visualización simplificada que oculta escenarios adversos deteriora la confianza cuando aparecen fallas. Es más responsable comunicar rangos, supuestos y límites del modelo.

La licencia social para operar no es un permiso jurídico ni un evento comunicacional. Es una condición relacional, cambiante y no transferible, sostenida por legitimidad, confianza y cumplimiento. Un proyecto con autorizaciones puede carecer de aceptación; otro con respaldo inicial puede perderla si incumple compromisos. Por ello, los costos de participación, reclamación y seguimiento deben incorporarse al cronograma y presupuesto como componentes de gobernanza, no como gastos reputacionales.

Figura 1.

Arquitectura multinivel de gobernanza para proyectos de ingeniería sostenible.



4.2. Financiamiento y viabilidad de las transformaciones

4.2.1. Inversión pública, financiamiento climático y cooperación internacional

Financiar una transición no equivale a conseguir dinero para construir activos. La viabilidad exige cubrir preparación, estudios, participación, adquisición,

operación, mantenimiento, reposición y cierre. En América Latina y el Caribe, Brichetti et al. (2021) estimaron que alcanzar metas de infraestructura vinculadas a los ODS requería invertir al menos 3,12 % del PIB regional cada año hasta 2030. La cifra expresa una necesidad regional agregada y no debe trasladarse como cuota automática a un país o sector.

La inversión pública se justifica cuando existen bienes públicos, externalidades, necesidades distributivas o riesgos que el mercado no asume. Su fortaleza es orientar servicios hacia territorios no rentables; su límite aparece en la restricción fiscal y en la capacidad de formular y ejecutar proyectos. La programación multianual debe proteger el mantenimiento. Construir más activos mientras se deterioran los existentes produce una falsa expansión del capital público.

El financiamiento climático comprende recursos destinados a mitigación y adaptación procedentes de fuentes públicas, privadas, nacionales o internacionales. No es sinónimo de cooperación internacional ni de inversión sostenible. El IPCC (2023) concluye que los flujos rastreados son inferiores a los necesarios en todos los sectores y regiones. En América Latina y el Caribe, Cárdenas y Peña (2024) reportan que la inversión climática regional de 2019–2020 representó 5,5 % del total mundial; la cifra corresponde a ese periodo y a la metodología utilizada por Climate Policy Initiative, por lo que no describe por sí sola suficiencia o impacto.

Los fondos climáticos concesionales aportan donaciones, préstamos blandos, garantías o asistencia técnica. Son adecuados para adaptación, preparación institucional y proyectos con beneficios públicos difíciles de monetizar. El acceso suele requerir entidades acreditadas, salvaguardas, teoría de cambio, indicadores climáticos y capacidad fiduciaria. Visconti et al. (2024) muestran que la complejidad de preparación, la fragmentación institucional y la limitada cartera de proyectos bancables restringen el acceso de varios países latinoamericanos. La cooperación debe financiar capacidades duraderas y no consultorías aisladas que desaparecen al cerrar el proyecto.

Los bonos verdes son deuda etiquetada cuyos recursos se asignan a categorías elegibles y se acompañan de marcos de uso de fondos, gestión y reporte. No crean recursos fiscales gratuitos: el emisor conserva la obligación de pago.

Pueden ampliar la base inversora y mejorar la trazabilidad, pero implican costos de estructuración, verificación y reporte. El Banco Mundial informó que los bonos verdes, sociales y sostenibles habían movilizado globalmente alrededor de USD 2,5 billones acumulados hasta enero de 2023; de ese total, emisores soberanos de mercados emergentes habían captado USD 74 mil millones (World Bank, 2023). Son cifras mundiales, nominales y acumuladas, no estimaciones de inversión efectivamente transformadora.

Las asociaciones público-privadas (APP) distribuyen responsabilidades de diseño, financiamiento, construcción, operación o mantenimiento mediante contratos de largo plazo. Una APP no es una fuente de recursos distinta del pago de usuarios o del Estado; es un mecanismo de entrega y asignación de riesgos. Puede aportar disciplina de ciclo de vida cuando el pago depende del servicio, pero genera pasivos contingentes, renegociaciones y riesgos de demanda. Debe utilizarse solo si el análisis de valor por dinero demuestra ventaja frente a la obra pública y si la administración puede gestionar contratos complejos.

La cooperación internacional cumple funciones adicionales: conocimiento, reducción de riesgo, garantías, preparación y coordinación regional. No conviene medirla únicamente por volumen desembolsado. Su calidad depende de alineación con prioridades nacionales, adicionalidad, transparencia, fortalecimiento de capacidades y salida sostenible.

Tabla 5.

Diferencias entre mecanismos de financiamiento

Mecanismo	Naturaleza	Adecuado para	Requisitos frecuentes	Riesgos principales
Presupuesto público	Ingreso fiscal o deuda soberana asignada	Bienes públicos y cierre de brechas	Priorización, evaluación y disciplina fiscal Adicionalidad	Subfinanciar mantenimiento; ciclos políticos
Financiamiento climático concesional	Donación, préstamo blando, garantía o asistencia	Mitigación, adaptación y fortalecimiento institucional	climática, salvaguardas, resultados y capacidad fiduciaria	Preparación costosa; fragmentación; dependencia

Bono verde	Deuda con uso de fondos etiquetado	Carteras elegibles con capacidad de repago	Marco, selección, trazabilidad y reporte	Greenwashing; costo de verificación; riesgo crediticio permanece
APP	Contrato de provisión con asignación de riesgos	Servicios medibles y de largo plazo	Valor por dinero, bancabilidad y gestión contractual	Pasivos contingentes, renegociación, tarifas regresivas
Cooperación internacional	Recursos, asistencia, garantías o conocimiento	Capacidades, bienes regionales y proyectos catalíticos	Alineación, adicionalidad y rendición de cuentas	Agenda externa o soluciones no sostenibles
Capital de impacto	Inversión con retorno y objetivo social/ambiental	Empresas escalables con ingresos	Medición de impacto y modelo de negocio	Selección de beneficiarios rentables; medición débil

4.2.2. Modelos de negocio, emprendimiento e innovación social

El modelo de negocio explica quién recibe valor, quién paga, cómo se cubren costos y qué capacidades sostienen la operación. En ingeniería sostenible, el usuario y el pagador pueden ser distintos. Una solución de drenaje beneficia a residentes, comercios y al sistema público, pero no genera un flujo directo suficiente. Un sistema de eficiencia energética sí puede pagarse con ahorros verificables. Confundir ambos casos conduce a modelos artificiales o a tarifas que excluyen.

Los modelos de servicio reducen el desembolso inicial: energía como servicio, iluminación por nivel de disponibilidad, reúso de agua por volumen y mantenimiento predictivo por desempeño. Trasladan al proveedor incentivos para conservar eficiencia, aunque requieren medición confiable y contratos que eviten dependencia tecnológica. La propiedad de datos, la portabilidad y la disponibilidad de repuestos deben definirse desde el inicio.

El emprendimiento puede explorar nichos y acelerar aprendizaje, pero enfrenta demanda incierta, regulación, ciclos largos de compra e infraestructura de prueba insuficiente. Las incubadoras universitarias aportan valor cuando conectan laboratorios, problemas territoriales, propiedad intelectual, validación y compra temprana. El apoyo no debería medirse solo por empresas creadas o

capital levantado; importa cuántas soluciones sobreviven, prestan servicios accesibles y reducen impactos comprobados.

La innovación social cambia relaciones y capacidades, no solamente dispositivos. Cooperativas energéticas, juntas de agua fortalecidas, redes de reparación y modelos comunitarios de monitoreo pueden ser innovaciones aun cuando empleen tecnología conocida. Su escala no siempre consiste en convertir una organización local en empresa nacional. Puede darse mediante réplica, federación, estándares abiertos o transferencia entre territorios.

Los modelos híbridos combinan subsidio público para acceso, tarifa por capacidad de pago, ingresos comerciales y financiamiento concesional. La combinación puede ampliar cobertura, pero necesita reglas transparentes. Los subsidios deben focalizarse en usuarios o resultados, no ocultar ineficiencias del operador. El indicador central es la sostenibilidad del servicio con equidad, no el cierre financiero de una transacción.

4.2.3. Costos, beneficios, riesgos y distribución del valor

El análisis financiero convencional descuenta flujos monetarios para estimar rentabilidad. El análisis económico incorpora costos y beneficios sociales, incluidos efectos sin precio de mercado. Ambos son útiles, pero no responden quién gana, quién pierde o qué riesgos son irreversibles. Dos proyectos con el mismo valor presente neto pueden tener distribuciones opuestas.

La evaluación debe separar costos de capital, operación, mantenimiento, transacción, adaptación, cierre y contingencias. En beneficios conviene distinguir ahorro directo, continuidad del servicio, salud, reducción de emisiones, empleo, tiempo, resiliencia y valor ecológico. La doble contabilización es un riesgo frecuente: el aumento de productividad y el ahorro de tiempo pueden representar parcialmente el mismo efecto.

La tasa de descuento expresa una decisión ética además de técnica. Tasas altas reducen el peso de daños y beneficios futuros; tasas bajas aumentan la importancia intergeneracional. No existe una tasa universal. Debe justificarse según normativa nacional, tipo de análisis, horizonte y tratamiento del riesgo. Los escenarios y análisis de sensibilidad son más honestos que una cifra única.

La distribución puede evaluarse desagregando resultados por territorio, ingreso, género, edad, discapacidad, pertenencia étnica y condición laboral, con protección de datos. También deben identificarse trabajadores y actividades desplazados. Una transición justa no promete ausencia de costos; establece anticipación, diálogo, reconversión, protección social y reparto de oportunidades. ONU Mujeres (2023) subraya que las políticas de transición energética deben reconocer diferencias en empleo, cuidados, acceso a energía, propiedad y participación.

Los registros de riesgo necesitan propietario, probabilidad, impacto, medida, indicador temprano y presupuesto. Riesgos climáticos, regulatorios, sociales, tecnológicos, cibernéticos, fiduciarios y de cadena de suministro interactúan. Transferirlos contractualmente no los elimina. Un riesgo asignado a una empresa sin capacidad financiera puede volver al Estado cuando falla el servicio.

4.3. Ética y responsabilidad profesional

4.3.1. Principios éticos para el diseño y la innovación tecnológica

La ética de la ingeniería se materializa en decisiones sobre cargas, tolerancias, materiales, datos, pruebas y mantenimiento. No es una revisión final ni una declaración de valores. Martin et al. (2021) encontraron que la educación ética suele quedar aislada de los cursos técnicos, lo que dificulta reconocer dilemas en contextos reales. Integrarla supone preguntar en cada etapa qué daños son previsibles, qué grupos carecen de voz, qué incertidumbre permanece y quién responde por fallas.

El principio de protección de la vida exige márgenes de seguridad, pero también atención a usos no previstos, mantenimiento deficiente y condiciones climáticas cambiantes. La prevención demanda eliminar peligros cuando sea posible; la precaución orienta decisiones cuando existe daño grave o irreversible con incertidumbre significativa. Precaución no significa paralización absoluta: implica comparar alternativas, reducir exposición, monitorear y mantener capacidad de reversión.

El diseño sostenible debe evitar trasladar impactos entre etapas. Un vehículo eléctrico reduce emisiones locales, pero su batería implica extracción, energía de fabricación y gestión al final de vida. El análisis de ciclo de vida ayuda a identificar desplazamientos, aunque sus resultados dependen de límites, inventarios y supuestos. La transparencia metodológica importa tanto como el indicador final.

Las tecnologías digitales añaden privacidad, ciberseguridad, sesgo y autonomía. Un sistema inteligente de agua puede detectar fugas, pero también revelar patrones domésticos. La minimización de datos, seguridad desde el diseño, control de acceso, retención limitada y mecanismos de impugnación deben definirse antes del despliegue. “Tener los datos” no equivale a tener legitimidad para cualquier uso.

La responsabilidad profesional incluye negarse a aprobar una solución insegura, documentar discrepancias y comunicar límites. Las organizaciones necesitan canales protegidos para alertas y revisión independiente. Si los incentivos premian velocidad y silencio, el código ético pierde eficacia.

4.3.2. Derechos humanos, equidad de género y protección de comunidades vulnerables

El enfoque de derechos transforma a las personas afectadas de receptoras de beneficios en titulares de derechos. Los Principios Rectores de las Naciones Unidas sobre Empresas y Derechos Humanos establecen el deber estatal de proteger, la responsabilidad empresarial de respetar y la necesidad de reparación. La Oficina del Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Derechos Humanos (2023) advierte que minerales, infraestructura y proyectos vinculados a la transición pueden reproducir abusos si se aceleran sin debida diligencia.

La debida diligencia exige identificar impactos reales y potenciales, prevenirlos, hacer seguimiento, comunicar y reparar. No se limita a la empresa principal; incluye contratistas y cadenas de suministro según el vínculo y la capacidad de influencia. La evaluación debe atender tierra, agua, salud, trabajo, cultura, privacidad y participación.

La equidad de género necesita datos y decisiones, no una mención transversal. ONU Mujeres (2022) propone analizar división del trabajo, acceso y control de recursos, participación, normas sociales y capacidades institucionales en infraestructura energética. El horario y lugar de una consulta, por ejemplo, pueden excluir a quienes realizan cuidados. Una tarifa aparentemente neutral puede afectar más a hogares con menor ingreso o jefatura femenina. Un diseño de transporte puede ignorar viajes encadenados asociados al cuidado.

El análisis interseccional reconoce que género interactúa con ruralidad, edad, discapacidad, etnicidad e ingreso. Los datos desagregados ayudan, pero deben proteger privacidad y evitar estigmatización. Cuando los grupos son pequeños, la publicación puede permitir reidentificación; conviene combinar agregación, consentimiento y gobernanza comunitaria de datos.

Las comunidades vulnerables no son homogéneas. El conocimiento indígena y local puede mejorar diseño y resiliencia, pero no debe extraerse sin consentimiento, reconocimiento y reglas sobre beneficios. El Banco Mundial (2024) destaca la importancia de asegurar derechos territoriales, participación y distribución equitativa de beneficios en financiamiento climático y mercados de carbono relacionados con pueblos indígenas.

4.3.3. Transparencia, rendición de cuentas y licencia social para operar

La transparencia útil responde qué se decidió, con qué evidencia, quién participó, qué riesgos quedaron y cómo reclamar. Publicar miles de páginas después de aprobar un proyecto no garantiza comprensión. La información debe ser oportuna, accesible, comparable y conservar trazabilidad de cambios.

La rendición de cuentas combina respuesta y consecuencia. Los responsables explican decisiones, corrigen desviaciones y enfrentan sanciones cuando corresponde. Esto requiere separación entre promotor, verificador y autoridad fiscalizadora. Las auditorías financiadas por el proyecto pueden ser técnicamente válidas, pero deben declarar conflictos de interés y permitir revisión.

Los tableros públicos son útiles si conectan indicadores con compromisos, no si exhiben métricas seleccionadas por conveniencia. Deben mostrar línea base, meta, avance, metodología, fecha y calidad del dato. Los incidentes, fallas y reclamaciones necesitan protocolos de divulgación compatibles con seguridad y privacidad.

La licencia social se fortalece cuando la comunidad observa coherencia entre promesas y comportamiento. Los acuerdos de beneficios deben ser claros, verificables y compatibles con derechos; no pueden comprar silencio ni sustituir compensación. Un mecanismo de quejas debe admitir canales presenciales y digitales, proteger contra represalias, registrar plazos y ofrecer apelación independiente.

4.4. Medición, seguimiento y aprendizaje

4.4.1. Indicadores integrados de sostenibilidad y resiliencia

Medir sostenibilidad exige conectar recursos, productos, resultados e impactos. Contar paneles instalados es un indicador de producto; medir continuidad, asequibilidad, reducción de emisiones y recuperación tras eventos extremos se acerca al resultado público. Cuando la gestión se recompensa por ejecutar presupuesto, puede maximizar activos sin mejorar servicios.

Un conjunto equilibrado debe incluir desempeño ambiental, social, económico, técnico e institucional. Los indicadores ambientales abarcan emisiones de ciclo de vida, agua, materiales, biodiversidad y residuos. Los sociales consideran acceso, asequibilidad, seguridad, empleo digno, género y participación. Los económicos miden costo de ciclo de vida, productividad y exposición fiscal. Los técnicos observan disponibilidad, confiabilidad, mantenibilidad e interoperabilidad. Los institucionales registran tiempos de respuesta, calidad de datos, cumplimiento y capacidad de aprendizaje.

La resiliencia no equivale solo a resistencia física. Incluye anticipar, absorber, recuperar y adaptarse manteniendo funciones esenciales. Un sistema puede recuperarse rápido en promedio y abandonar durante semanas a una comunidad periférica. Por ello, el tiempo de recuperación debe desagregarse por territorio y servicio crítico.

Los indicadores requieren fichas técnicas: definición, unidad, fórmula, fuente, frecuencia, responsable, desagregación, incertidumbre y regla de decisión. ISO (2018) recomienda integrar gestión de riesgos a la gobernanza y a la toma de decisiones; la norma ofrece directrices y no certifica por sí misma la resiliencia de un proyecto.

Tabla 6.

Núcleo de indicadores integrados para proyectos sostenibles

Dimensión	Indicador ilustrativo	Pregunta de gestión	Precaución metodológica
Ambiental	Emisiones de GEI de ciclo de vida por unidad de servicio	¿Se reduce impacto total o se desplaza?	Declarar límites, factores y escenario de referencia
Social	Cobertura asequible, desagregada	¿Quién accede y quién queda fuera?	Definir asequibilidad y proteger datos personales
Técnica	Disponibilidad y tiempo de recuperación	¿El servicio resiste y se recupera?	Separar promedio de zonas críticas
Económica	Costo total por unidad de servicio	¿Es sostenible durante su vida útil?	Incluir mantenimiento, reposición y cierre
Institucional	Porcentaje de acciones correctivas cerradas a tiempo	¿La organización aprende de desviaciones?	Auditar calidad, no solo cierre administrativo
Participativa	Reclamaciones resueltas con satisfacción verificable	¿El mecanismo produce remedio?	No equiparar archivo del caso con solución

4.4.2. Evaluación multicriterio, análisis de riesgos y costo-beneficio

La evaluación multicriterio es pertinente cuando hay objetivos inconmensurables: costo, emisiones, biodiversidad, seguridad, empleo y aceptación. Su fortaleza es hacer explícitos criterios y ponderaciones. Su debilidad aparece cuando los pesos se presentan como científicos pese a reflejar preferencias. El proceso debe documentar quién seleccionó criterios, cómo se normalizaron datos, qué incertidumbres existen y cómo cambia el ranking con otros pesos.

El análisis costo-beneficio permite comparar efectos en una unidad monetaria, pero la monetización de salud, biodiversidad o cultura es controvertida y a veces

insuficiente. Ciertos derechos y límites de seguridad deben tratarse como restricciones, no como costos compensables. Un proyecto no se vuelve ético porque beneficios agregados superen daños graves concentrados.

El análisis de riesgos complementa ambos métodos. Los escenarios deben incluir fallas comunes, eventos extremos, dependencia de proveedores, cambios regulatorios, ciberataques y conflictos. La simulación puede representar variabilidad, pero no elimina incertidumbre profunda. Las decisiones robustas buscan alternativas aceptables en varios futuros, no la solución óptima bajo un único pronóstico.

Una secuencia razonable consiste en filtrar alternativas que incumplen derechos o estándares mínimos; comparar las restantes con criterios transparentes; realizar costo-beneficio y costo-efectividad; probar sensibilidad; y someter resultados a deliberación. Esta combinación evita que una sola herramienta domine la decisión.

4.4.3. Monitoreo, adaptación y aprendizaje a partir de resultados

El monitoreo tiene valor cuando activa decisiones. Cada indicador crítico debe asociarse a umbrales y respuestas: investigar, reducir operación, corregir diseño, compensar o suspender. Sin reglas de acción, el tablero se convierte en archivo. El seguimiento combina sensores, registros administrativos, inspecciones y conocimiento ciudadano. Los sensores ofrecen frecuencia, pero pueden fallar, sesgarse o perder calibración. La verificación independiente y el mantenimiento del sistema de datos son parte del proyecto. Los datos abiertos deben respetar privacidad, seguridad y derechos colectivos.

La gestión adaptativa define hipótesis, monitorea, compara resultados y ajusta. No debe utilizarse para aprobar proyectos inmaduros prometiendo corregir después daños previsibles. Funciona cuando existe incertidumbre residual, medidas reversibles, presupuesto de contingencia y autoridad para actuar. El aprendizaje institucional requiere registrar incidentes y casi fallas sin castigar automáticamente su reporte. Las revisiones posteriores deben identificar causas técnicas, organizativas y contractuales. Una base regional de lecciones, anonimizada cuando sea necesario, puede reducir repetición de errores y acelerar difusión de soluciones.



a posteriori a 2030

temas complejos y

gior matemático y físico,
ecológicos. La UNESCO
les capaces de contribuir
que la ética requiere

alimentaciones, retrasos,
tica conecta escenarios,
cia digital incluye datos,
ritmos. La competencia
as y participación. La
os de valores, derechos

e incertidumbre. La competencia colaborativa facilita trabajar con otras disciplinas y conocimientos comunitarios.

Estas capacidades no se desarrollan en una asignatura aislada. Deben aparecer en proyectos de diseño, laboratorios, prácticas, evaluación económica y trabajo territorial. Un estudiante puede calcular una estructura y, a la vez, comparar materiales por ciclo de vida, justificar supuestos climáticos, elaborar un plan de mantenimiento y explicar decisiones a una comunidad.

La evaluación educativa debe valorar procesos y no solo respuestas finales. Portafolios, revisiones de diseño, análisis de incidentes y proyectos con usuarios permiten observar razonamiento. Las alianzas con municipios, empresas y comunidades ofrecen problemas reales, siempre que no utilicen a los territorios como laboratorios sin beneficio ni devolución.

4.5.2. Investigación interdisciplinaria, ciencia abierta y cooperación

Los problemas de transición desbordan disciplinas. La interdisciplinariedad productiva necesita una pregunta compartida, métodos compatibles y gobernanza de datos; reunir especialistas sin integración genera informes paralelos. Las universidades pueden crear laboratorios de misión organizados por problemas —agua, movilidad, circularidad, resiliencia— con participación de ciencias sociales, salud, economía y derecho.

La Recomendación de la UNESCO sobre Ciencia Abierta, adoptada en 2021 por 193 Estados miembros, promueve acceso, infraestructuras, diálogo con otros sistemas de conocimiento y cooperación equitativa (UNESCO, 2021c). Es una recomendación internacional: orienta políticas, pero su aplicación depende de decisiones nacionales e institucionales. Abrir publicaciones no basta. Datos, código, protocolos y resultados negativos aumentan reproducibilidad cuando existen consentimiento, seguridad, soberanía de datos y recursos para curación.

La ciencia abierta puede profundizar desigualdades si instituciones con más capacidad extraen datos de territorios o si las tasas de publicación excluyen investigadores. Los acuerdos deben reconocer autoría, propiedad intelectual, conocimientos tradicionales, beneficios y responsabilidades de mantenimiento.

La cooperación Sur–Sur puede facilitar soluciones ajustadas a climas, instituciones y restricciones similares.

4.5.3. Escenarios emergentes y agenda propositiva para la ingeniería del futuro

Un escenario probable prolonga tendencias observables. Hacia la década de 2030 es probable que aumenten la digitalización de infraestructura, los requisitos de divulgación climática, la presión por materiales de menor carbono y la necesidad de adaptación. También es probable que persistan brechas territoriales y escasez de capacidades públicas. Esta combinación puede producir sistemas más eficientes, pero también dependencia de plataformas, exposición cibernética y desigualdad si no existen interoperabilidad y acceso.

Un escenario posible incorpora discontinuidades plausibles: avances en almacenamiento, hidrógeno, inteligencia artificial, biotecnología o captura de carbono; choques en cadenas de suministro; eventos climáticos compuestos; cambios en comercio de carbono; o rechazo social a infraestructuras. No se afirma que ocurrirán. Prepararse implica portafolios, pruebas controladas, estándares adaptativos y planes de contingencia.

El escenario deseable es normativo: servicios universales bajos en carbono, infraestructura resiliente, economía circular, trabajo digno, datos bajo control democrático y comunidades con poder efectivo. No emerge automáticamente de innovación. Requiere políticas distributivas, inversión sostenida y mecanismos de rendición de cuentas.

Tabla 7.

Escenarios posteriores a 2030 y respuesta de ingeniería

Tipo	Base	Rasgos	Riesgo	Respuesta recomendada
Probable	Continuidad de tendencias documentadas	Más digitalización, adaptación y exigencias de desempeño	Brechas y dependencia tecnológica	Interoperabilidad, capacidades públicas y métricas distributivas

Possible	Discontinuidades plausibles	Avances rápidos o choques tecnológicos, climáticos y comerciales	Decisiones irreversibles bajo incertidumbre	Portafolios, opciones reversibles y análisis de robustez
Deseable	Objetivos éticos y públicos	Servicios universales, bajo carbono, circularidad y participación	Quedar en aspiración sin instrumentos	Metas vinculantes cuando corresponda, presupuesto, responsables y control social

Agenda propositiva basada en evidencia

La agenda siguiente traduce los problemas examinados en líneas de acción. Debe adaptarse a competencias nacionales y territoriales, y someterse a evaluación.

- **Organizar carteras de misión.** Seleccionar desafíos medibles, combinar proyectos tecnológicos e institucionales y asignar una autoridad responsable de resultados.
- **Exigir planes de servicio y mantenimiento.** Ninguna inversión debería aprobarse sin operador, presupuesto recurrente, repuestos, datos y estrategia de cierre.
- **Reformar compras hacia desempeño de ciclo de vida.** Incorporar costo total, resiliencia, circularidad y resultados sociales con criterios verificables y acceso para pymes.
- **Crear capacidad territorial de formulación.** Equipos regionales y locales necesitan apoyo estable en ingeniería, finanzas, salvaguardas, contratación y participación.
- **Construir una cartera climática preparada.** Estandarizar estudios, salvaguardas e indicadores sin uniformar contextos; financiar preparación antes de buscar capital.
- **Aplicar pruebas distributivas.** Toda gran decisión debe informar beneficios, costos y riesgos por grupos y territorios, junto con medidas de transición justa.

- **Integrar debida diligencia ética.** Incluir derechos humanos, género, privacidad, seguridad y cadenas de suministro en revisiones de diseño y contratos.
- **Vincular monitoreo con corrección.** Definir umbrales, responsables, presupuesto y transparencia; incorporar verificación independiente y reclamaciones.
- **Actualizar formación y acreditación.** Evaluar pensamiento sistémico, ciclo de vida, ética aplicada, comunicación y trabajo interdisciplinario dentro de proyectos técnicos.
- **Fortalecer ciencia abierta responsable.** Compartir datos, código y aprendizajes con reglas sobre privacidad, conocimientos colectivos, autoría y sostenibilidad de repositorios.
- **Institucionalizar anticipación.** Realizar escenarios conectados a presupuesto, regulación y cartera, con revisiones periódicas y opciones reversibles.
- **Cooperar regionalmente.** Compartir laboratorios, estándares, datos climáticos, compras agregadas y lecciones entre países latinoamericanos, preservando autonomía y contexto.

Este capítulo mostró que la ingeniería sostenible es una práctica institucional antes que una colección de tecnologías. La coordinación multinivel conecta objetivos con territorio; la regulación protege sin congelar innovación; la contratación crea demanda; la participación incorpora derechos y conocimiento; el financiamiento cubre el ciclo de vida; la ética define límites y responsabilidades; y el monitoreo convierte resultados en aprendizaje. Cada pieza pierde eficacia cuando opera aislada.

El recorrido del libro permite una conclusión más amplia. Innovación, tecnología y soluciones de ingeniería pueden contribuir a los desafíos del siglo XXI si se evalúan como sistemas sociotécnicos. La eficiencia debe leerse junto con suficiencia y distribución; la descarbonización, junto con adaptación y biodiversidad; la digitalización, junto con privacidad y acceso; la infraestructura, junto con mantenimiento y gobernanza. El marco peruano y latinoamericano exige especial atención a desigualdad, diversidad territorial, capacidad estatal y exposición climática.

Después de 2030, la incertidumbre aumentará, no disminuirá. La respuesta profesional no consiste en prometer control total, sino en diseñar soluciones seguras, adaptables, auditables y justas. La ingeniería del futuro será capaz de calcular con rigor y, al mismo tiempo, explicar sus supuestos, reconocer límites, distribuir valor, escuchar conflicto y aprender de resultados. Esa combinación ofrece una base más realista para convertir la sostenibilidad en desempeño público duradero.

Referencias Bibliográficas

- Abd Wahab, N. H., Hasikin, K., Lai, K. W., Xia, K., Bei, L., Paul, A. K., & Wu, X. (2024). *Systematic review of predictive maintenance and digital twin technologies: Challenges, opportunities, and best practices*. *PeerJ Computer Science*, 10, e1943. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1943>
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2025a). *From risk to reliability: Resilient infrastructure services to face nature's challenges*. <https://publications.iadb.org/publications/english/document/From-Risk-to-Reliability-Resilient-Infrastructure-Services-to-Face-Natures-Challenges.pdf>
- Blanco, J. P., Fageda, X., & Flores-Fillol, R. (2022). *Decarbonising transport in Latin American cities: A review of policies and key challenges*. Banco Interamericano de Desarrollo. <https://publications.iadb.org/publications/english/document/Decarbonising-Transport-in-Latin-American-Cities-A-Review-of-Policies-and-Key-Challenges.pdf>
- Brichetti, J. P., Mastronardi, L., Rivas Amiassorho, M. E., Serebrisky, T., & Solís, B. (2021). *The infrastructure gap in Latin America and the Caribbean: Investment needed through 2030 to meet the Sustainable Development Goals*. Banco Interamericano de Desarrollo. <https://publications.iadb.org/publications/english/document/The-Infrastructure-Gap-in-Latin-America-and-the-Caribbean-Investment-Needed-Through-2030-to-Meet-the-Sustainable-Development-Goals.pdf>
- Calatayud, A., Sánchez González, S., Bedoya-Maya, F., Giraldez, F., & Márquez, J. M. (2023). *Transportation 2050: Pathways to decarbonization and climate resilience in Latin America and the Caribbean*. Banco Interamericano de Desarrollo. <https://publications.iadb.org/publications/english/document/Transportation-2050-pathways-to-decarbonization-and-climate-resilience-in-Latin-America-and-the-Caribbean.pdf>

- Cárdenas, M., & Peña, C. (2024). *Climate action in Latin America and the Caribbean: Fiscal policies and the indispensable role of finance ministries*. Inter-American Development Bank. <https://doi.org/10.18235/0013066>
- Castro, C. G., Trevisan, A. H., Pigosso, D. C. A., & Mascarenhas, J. (2022). The rebound effect of circular economy: Definitions, mechanisms and a research agenda. *Journal of Cleaner Production*, 345, 131136. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131136>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2021a). *Economía circular en América Latina y el Caribe: Oportunidad para una recuperación transformadora*. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/47309-economia-circular-america-latina-caribe-oportunidad-recuperacion-transformadora>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2022). *Un camino digital para el desarrollo sostenible de América Latina y el Caribe*. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/48460-camino-digital-desarrollo-sostenible-america-latina-caribe>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2023). *Panorama de las hojas de ruta de economía circular en América Latina y el Caribe*. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/037778b3-04da-4351-a558-3dded786ab50/content>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2026). *The 2030 agenda in Latin America and the Caribbean: Regional progress and challenges*. https://foroalc2030.cepal.org/2026/sites/foro2026/files/2600127e_fds.9_summary_web.pdf
- Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. (1987). *Nuestro futuro común*. Naciones Unidas.
- De Silva, A., & Kawasaki, A. (2022). Green and blue infrastructure as nature-based solutions for better disaster preparedness: Lessons from Sri Lanka. *Sustainability*, 14(23), 16155. <https://doi.org/10.3390/su142316155>
- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. (2019). *Impact assessment of ecosystem-based adaptation in mountain ecosystems in*

Federación Mundial de Organizaciones de Ingeniería. (2023). *Model code of ethics*. <https://www.wfeo.org/code-of-ethics/>

Font Vivanco, D., Freire-González, J., Galvin, R., Santarius, T., Walnum, H. J., Makov, T., & Sala, S. (2022). Rebound effect and sustainability science: A review. *Journal of Industrial Ecology*, 26(4), 1543–1563. <https://doi.org/10.1111/jiec.13295>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). *The state of food and agriculture 2022: Leveraging automation in agriculture for transforming agrifood systems*. <https://doi.org/10.4060/cb9479en>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). *The state of food security and nutrition in the world 2023*. <https://doi.org/10.4060/cc3017en>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2025). *Digital agriculture and artificial intelligence: Innovation for agrifood systems*. <https://www.fao.org/innovation/digital-agriculture-and-ai-innovation/>

Gallego-Schmid, A., Chen, H.-M., Sharmina, M., & Mendoza, J. M. F. (2024). Circular economy in Latin America and the Caribbean: Drivers, opportunities, barriers and strategies. *Sustainable Production and Consumption*, 51, 118–134. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.09.006>

Gómez-Lobo, A., Briones, I., & Ponce, F. (2025). *Putting the passenger first: What works and what does not work in urban mobility reforms in Latin America and the Caribbean*. Banco Interamericano de Desarrollo. <https://publications.iadb.org/publications/english/document/Putting-the-Passenger-First-What-Works-and-What-does-not-Work-in-Urban-Mobility-Reforms-in-Latin-America-and-the-Caribbean.pdf>

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022: Mitigation of climate change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926>

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022a). Cities, settlements and key infrastructure. En H.-O. Pörtner et al. (Eds.), *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability* (pp. 907–1040). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.008>

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022b). Central and South America. En H.-O. Pörtner et al. (Eds.), *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability* (pp. 1689–1816). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.014>

International Energy Agency. (2021a). *Hydrogen in Latin America: From near-term opportunities to large-scale deployment*. <https://www.iea.org/reports/hydrogen-in-latin-america>

International Energy Agency. (2021b). *The role of critical minerals in clean energy transitions*. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>

International Energy Agency. (2023a). *Electricity grids and secure energy transitions*. <https://www.iea.org/reports/electricity-grids-and-secure-energy-transitions>

International Energy Agency. (2024a). *Renewables 2024: Analysis and forecast to 2030*. <https://www.iea.org/reports/renewables-2024>

International Energy Agency. (2024b). *World energy investment 2024*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2024>

International Energy Agency. (2025a). *Energy and AI*. <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai>

International Energy Agency. (2025b). *World energy investment 2025*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2025>

International Organization for Standardization. (2018). *ISO 31000:2018 Risk management—Guidelines*. <https://www.iso.org/standard/65694.html>

International Organization for Standardization. (2020). *ISO 26000 and the SDGs*. <https://www.iso.org/publication/PUB100401.html>

Resumen

La ingeniería desempeña un papel decisivo en la construcción de modelos de desarrollo capaces de responder a la crisis climática, la degradación ambiental y las desigualdades territoriales. Esta obra examina la relación entre ingeniería y sostenibilidad desde una mirada crítica, sistémica y orientada a soluciones, con especial atención a la realidad peruana y a los desafíos compartidos por América Latina. El recorrido inicia con el análisis de la crisis socioambiental y la transformación de las responsabilidades profesionales ante los límites ecológicos. Luego se estudian tecnologías e innovaciones aplicadas a la transición energética, la gestión del agua, la agricultura, la industria, los materiales y la digitalización. También se abordan la infraestructura resiliente, la movilidad, las edificaciones sostenibles, las soluciones basadas en la naturaleza y la economía circular, considerando las particularidades de cada territorio. Se examinan la gobernanza, el financiamiento, la ética, la participación social y la formación de los futuros profesionales. El libro sostiene que ninguna tecnología garantiza por sí sola la sostenibilidad: su aporte depende del contexto, el ciclo de vida, la capacidad institucional, la justicia social y la participación de las comunidades.

Palabras Clave: ingeniería sostenible; innovación tecnológica; transición ecológica; economía circular; gobernanza ambiental.

Abstract

Engineering plays a decisive role in building development models capable of responding to climate change, environmental degradation, and territorial inequalities. This book examines the relationship between engineering and sustainability from a critical, systemic, and solution-oriented perspective, with particular attention to the Peruvian context and the challenges shared across Latin America. It begins by analyzing the socio-environmental crisis and the transformation of professional responsibilities in the face of ecological limits. It then explores technologies and innovations applied to the energy transition, water management, agriculture, industry, materials, and digitalization. The discussion also covers resilient infrastructure, mobility, sustainable buildings, nature-based solutions, and the circular economy, considering the specific characteristics of each territory. Finally, the book addresses governance, financing, ethics, social participation, and the education of future professionals. It argues that no technology can ensure sustainability on its own: its contribution depends on the context in which it is implemented, its life cycle, institutional capacity, social justice, and meaningful community participation.

Keywords: sustainable engineering; technological innovation; ecological transition; circular economy; environmental governance.

ISBN: 978-9907-9567-3-3



Una obra colectiva
que integra
conocimientos,
experiencias y
propuestas
innovadoras desde
las diferentes ramas
de la Ingeniería para
impulsar un futuro
sostenible, resiliente
y equitativo para las
poximas
generaciones.



Innovación
con propósito



Tecnologías
sostenibles



Bienestar
social



Impacto
ambiental positivo



Desarrollo
sostenible

“

La sostenibilidad no es una opción,
es la única vía hacia el progreso
que perdura.



Ingeniería hoy,
un mejor mañana.



OM
EDITORIAL