

LIBRO VERDE UTEC

Estado del medioambiente en El Salvador y perspectivas de sostenibilidad

Saúl Campos Morán



LIBRO VERDE UTEC

Estado del medioambiente en El Salvador y perspectivas de sostenibilidad

Análisis bajo el enfoque de Fuerzas Motrices–Presión–Estado–Impacto
–Respuesta (FMPEIR)

Saúl Campos Morán
saul.campos@utec.edu.sv

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8884-5547>

Este trabajo fue subvencionado por la Universidad Tecnológica de El Salvador. Las solicitudes de información, separatas y otros documentos relacionados con este estudio pueden enviarse a la siguiente dirección: Universidad Tecnológica de El Salvador, edificio Dr. José Adolfo Araujo Romagoza, Vicerrectoría de Investigación y Proyección Social, Dirección de Investigaciones, calle Arce y 19.a avenida Sur, 1045, o por correo electrónico a marlon.lobos@utec.edu.sv.

San Salvador, 2026
Derechos reservados
© Copyright
Universidad Tecnológica de El Salvador

363.700 972 84

C367L Campos Morán, Saúl

slv Libro verde Utec : estado del medioambiente en El Salvador y perspectiva de sostenibilidad / Saúl Campos Morán; revisión y corrección Noel Castro ; diseño y diagramación Guillermo Contreras. - 1ª ed. - San Salvador, El Salv. : Universidad Tecnológica de El Salvador, 2026.

166 p. ; 23 cm.

ISBN 978-99961-86-52-3 (impreso)

1. Medio ambiente-Investigaciones-El Salvador. 2. Desarrollo sostenible. 3. Ecología política. 4. Desarrollo económico. I. Título.

BINAES

Autoridades Utec

Lic. José Mauricio Loucel Funes

Presidente

Lic. Carlos Reynaldo López Nuila

Vicepresidente

Ing. Nelson Zárate Sánchez

Rector

LIBRO VERDE UTEC

Estado del medioambiente en El Salvador y perspectivas de sostenibilidad

Análisis bajo el enfoque de Fuerzas Motrices–Presión–Estado–Impacto–Respuesta (FMPEIR)

Saúl Campos Morán

Vicerrectoría de Investigación y Proyección Social

Dra. Noris Isabel López Guevara

Vicerrectora de Investigación y Proyección Social

Dra. Camila Calles Minero

Directora de Investigaciones

Noel Castro

Revisión y corrección

Guillermo Contreras

Diseño y diagramación

PRIMERA EDICIÓN
30 ejemplares
Mayo, 2026

Impreso en El Salvador
Por Tecnoimpresos, S.A. de C.V.
19 Av. Norte, n°. 125, San Salvador, El Salvador
Tel.:(503) 2275-8861 • gcomercial@utec.edu.sv

Contenido

Índice de tablas	
Índice de figuras	
Introducción.....	13

Capítulo 1.

Situación actual del medioambiente en El Salvador: Línea de base empírica

1.1 Estado de los componentes ambientales	16
1.1.1 Recursos hídricos y calidad del agua.....	17
1.1.2 Cobertura forestal, uso del suelo y degradación edáfica ...	20
1.1.3 Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y estructura energética.....	22
1.1.4 Residuos sólidos y saneamiento	24
1.1.5 Estructura sociodemográfica y vulnerabilidad climática ...	26
1.2 Principales impactos ambientales.....	28
1.2.1 Impactos sobre la salud pública	29
1.2.2 Impactos económicos	30
1.2.3 Impactos sobre los servicios ecosistémicos.....	32
1.2.4 Vulnerabilidad social diferenciada y justicia ambiental.....	34
1.3 Respuestas institucionales: Avances y brechas.....	35
1.3.1 Marco normativo e institucional	36
1.3.2 Transición energética	37
1.3.3 Restauración ecosistémica, biodiversidad y gestión del riesgo.....	39
1.4 Síntesis: El perfil ambiental de El Salvador.....	41

Capítulo 2.

Planteamiento del problema

2.1 La fragmentación del conocimiento ambiental y la necesidad de integración	43
--	----

2.2	Los compromisos internacionales y la necesidad de evidencia nacional	45
2.3	La vulnerabilidad climática y los riesgos acumulativos	46
2.4	La degradación de ecosistemas y la presión sobre los recursos naturales	47
2.5	El rol de la educación superior y la producción de conocimiento aplicado	48
2.6	Síntesis y propósito	48

Capítulo 3. Marco teórico

3.1	Introducción al marco teórico	50
3.2	El paradigma del desarrollo sostenible.....	51
3.2.1	Fundamentos conceptuales y evolución histórica	51
3.2.2	Los ODS como marco normativo	52
3.2.3	El concepto de límites planetarios.....	53
3.3	Ecología política como marco analítico	53
3.3.1	Fundamentos de la ecología política.....	53
3.3.2	Metabolismo social y flujos de materiales y energía	54
3.3.3	Justicia ambiental, distribución de riesgos e historia ambiental	54
3.4	Ciencias de la sostenibilidad y sistemas socioecológicos.....	55
3.4.1	Las ciencias de la sostenibilidad.....	55
3.4.2	Marco de los SSE y resiliencia.....	55
3.5	El modelo FMPEIR: Fundamentos, componentes y aplicación a El Salvador	56
3.5.1	Genealogía del modelo: de PER a FMPEIR.....	56
3.5.2	Componentes del modelo FMPEIR aplicados a El Salvador	57
	Fuerzas Motrices (F)	57
	Presiones (P).....	57
	Estado (E)	58
	Impacto (I).....	58
	Respuesta (R)	59

3.5.3	Retroalimentaciones sistémicas y limitaciones del modelo	59
3.6	Marco normativo e institucional de la gestión ambiental en El Salvador	60
3.6.1	Arquitectura institucional ambiental.....	60
3.6.2	Compromisos internacionales y gobernanza adaptativa....	60
3.7	Vulnerabilidad, riesgo y cambio climático en El Salvador	61
3.7.1	Conceptualización de la vulnerabilidad socioambiental....	61
3.7.2	Cambio climático, desastres siconaturales y gestión del riesgo.....	61
3.8	Servicios ecosistémicos, capital natural y perspectivas de sostenibilidad	62
3.8.1	Marco de los servicios ecosistémicos.....	62
3.8.2	Perspectivas de sostenibilidad: transiciones, economía circular y soluciones basadas en la naturaleza...	62
3.9	Articulación del marco teórico con el modelo FMPEIR y orientaciones metodológicas	63

Capítulo 4.

Diseño metodológico

4.1	Propósito, alcance y preguntas de investigación.....	65
4.1.1	Propósito	65
4.1.2	Alcance	66
4.1.3	Preguntas de investigación.....	67
4.1.4	Herramientas e instrumentos.....	67
4.2	Enfoque metodológico general	68
4.2.1	Diseño mixto secuencial explicativo	68
4.2.2	Postura epistemológica	69
4.3	Estrategia de recolección y sistematización de información	69
4.3.1	Fuentes de información cuantitativa.....	69
4.4	Tablero de indicadores cuantitativos FMPEIR.....	70
4.4.1	Indicadores núcleo.....	70
4.4.2	Indicadores complementarios.....	71
4.5	Análisis estadístico de las series de indicadores	72

4.5.1 Estadística descriptiva e identificación de patrones	72
4.5.2 Análisis de tendencias	72
4.5.3 Interpretación integrada bajo el esquema FMPEIR	73
4.6 Construcción del Índice Sistémico de Sostenibilidad	
Ambiental (ISSA).....	74
4.6.1 Justificación y propósito del índice	74
4.6.2 Etapas de construcción del ISSA.....	74
4.6.3 Interpretación del ISSA y análisis de sensibilidad	76
4.7 Construcción de escenarios prospectivos de sostenibilidad.....	77
4.7.1 Marco conceptual y función de los escenarios	77
4.7.2 Los tres escenarios	77
4.8 Consideraciones éticas y criterios de calidad.....	78
4.8.1 Consideraciones éticas	78

Capítulo 5.

Resultados: Análisis multidimensional de indicadores ambientales

5.1 Caracterización de los hallazgos generales y síntesis del ranking	80
5.2 Dimensión WASH: La transición sanitaria.....	83
5.2.1 Saneamiento, higiene y agua segura.....	83
5.2.2 Mortalidad atribuible a causas ambientales	87
5.3 Transición energética doméstica y combustibles limpios.....	90
5.3.2 Producción eléctrica renovable	92
5.4 Uso del suelo, cobertura forestal y degradación ecosistémica	93
5.4.1 Estructura de uso del suelo	94
5.4.2 Cobertura forestal	95
5.4.3 Exposición territorial a riesgo costero.....	96
5.5 Emisiones de GEI	98
5.5.1 Emisiones totales y por sector.....	99
5.5.2 Emisiones LULUCF	104
5.5.3 Intensidad de carbono y gases fluorados	106
5.5.4 Emisiones de óxido nitroso	108
5.6 Recursos hídricos, presión extractiva y capital natural ajustado.....	109

5.6.1	Extracción de agua dulce y estrés hídrico	110
5.6.2	Capital natural ajustado y ahorro genuino	113
5.7	Biodiversidad, ecosistemas y capital natural	122
5.7.1	Especies amenazadas	123
5.8	El ISSA: Construcción, trayectoria y proyección	124
5.8.1	Metodología de construcción del ISSA.....	124
5.8.2	Trayectoria histórica del índice.....	125
5.8.3	Puntajes por dimensión FMPEIR: Análisis de la estructura interna del ISSA.....	127
5.8.4	Perfil FMPEIR 2023: Radiografía del sistema ambiental...	130
5.8.5	Proyección del ISSA 2024–2050: Escenario tendencial y horizontes de sostenibilidad.....	131
5.9	Análisis multivariado de robustez e intensidad del cambio: Matriz de cuadrantes estratégica	134
5.9.1	Metodología del análisis de dispersión y matriz de cuadrantes.....	134
5.9.2	Distribución general de los indicadores y hallazgos estadísticos globales	135
5.9.3	Matriz de cuadrantes: Clasificación estratégica de los indicadores.....	137
5.9.4	Análisis sectorial de transformaciones estructurales: Puntajes Z intrasector.....	139
5.9.5	Síntesis estratégica: El modelo de transición ambiental incremental.....	140
5.10	Síntesis sistémica bajo el modelo FMPEIR: Conclusiones del estudio	141
5.10.1	El estado actual del sistema: Un perfil ambiental en transición asimétrica.....	142
5.10.2	La lógica causal del sistema FMPEIR en El Salvador: Cinco dimensiones en interacción.....	143
5.10.3	Los avances: Lo que el análisis confirma con solidez empírica	144
5.10.4	Las brechas estructurales: Lo que el análisis revela como desafíos no resueltos	145

5.10.5	El ISSA como instrumento de gobernanza: Implicaciones de la trayectoria y la proyección	146
5.10.6	El vector transversal de la transición energética y sus límites	148
5.10.7	La vulnerabilidad climática como amplificador sistémico de las brechas	149
5.10.8	Orientaciones para la investigación y la gobernanza: de los resultados a la acción	150
5.10.9	Conclusión: El sistema ambiental salvadoreño en perspectiva histórica y prospectiva.....	153
Referencias		154

Índice de tablas

Tabla 1.	Indicadores de recursos hídricos y calidad del agua — El Salvador	19
Tabla 2.	Indicadores de cobertura forestal, uso del suelo y degradación edáfica — El Salvador	21
Tabla 3.	Indicadores de emisiones de GEI, energía y calidad del aire — El Salvador.....	24
Tabla 4.	Indicadores de gestión de residuos sólidos y saneamiento — El Salvador	26
Tabla 5.	Indicadores demográficos, climáticos y de vulnerabilidad territorial — El Salvador	27
Tabla 6.	Indicadores de impactos ambientales sobre la salud pública — El Salvador.....	30
Tabla 7.	Indicadores de impactos económicos de la degradación ambiental — El Salvador.....	31
Tabla 8.	Indicadores de servicios ecosistémicos y biodiversidad — El Salvador	33
Tabla 9.	Indicadores de vulnerabilidad social diferenciada y justicia ambiental — El Salvador.....	35
Tabla 10.	Marco normativo e institucional de la gestión ambiental — El Salvador	37

Tabla 11.	Indicadores de la transición energética — El Salvador.....	38
Tabla 12.	Indicadores de respuestas en restauración ecosistémica y gestión del riesgo — El Salvador	40

Índice de figuras

Figura 1.	Ranking de indicadores con mayor significancia estadística ($p < 0.05$).....	81
Figura 2.	Distribución de indicadores significativos por dimensión FMPEIR.	82
Figura 3.	Acceso a servicios de higiene básica (SH.STA.HYGN, % población).	83
Figura 4.	Saneamiento gestionado de forma segura (SH.STA.SMSS).....	84
Figura 5.	Defecación al aire libre en la zona rural (% de población rural).....	84
Figura 6.	Defecación al aire libre en el total nacional (%)	85
Figura 7.	Saneamiento al menos básico (SH.STA.BASS.ZS, % población).	86
Figura 8.	Saneamiento básico rural (% población rural).	86
Figura 9.	Agua potable gestionada de forma segura (SH.H2O.SMDW.ZS).....	87
Figura 10.	Mortalidad atribuible a factores ambientales (SH.STA.POIS.P, tasa por 100,000).....	88
Figura 11.	Mortalidad femenina atribuible a envenenamiento accidental	88
Figura 12.	Mortalidad masculina atribuible a envenenamiento accidental.	89
Figura 13.	Mortalidad global por envenenamiento accidental (total).	89
Figura 14.	Acceso a combustibles y tecnologías limpias para cocinar en el total (%).....	90
Figura 15.	Acceso a combustibles limpios para cocinar en la zona rural (% de población rural).....	91

Figura 16. Acceso a combustibles limpios para cocinar en la zona urbana (% de población urbana).	91
Figura 17. Acceso a electricidad (% de población total)	92
Figura 18. Producción de electricidad renovable excluyendo hidroeléctrica (% total).	92
Figura 19. Producción de electricidad renovable en términos absolutos (kWh).	93
Figura 20. Superficie agrícola como porcentaje del área total (1960–2022).	94
Figura 21. Tierra arable como porcentaje del área total.	94
Figura 22. Área forestal como porcentaje del territorio (1990–2020) ..	95
Figura 23. Área forestal en km ²	96
Figura 24. Área terrestre a menos de 5 metros sobre el nivel del mar (% total).	96
Figura 25. Área rural a menos de 5 metros de elevación (km ²).	97
Figura 26. Área urbana a menos de 5 metros de elevación (% total)..	97
Figura 27. Síntesis de la estructura territorial	98
Figura 28. Emisiones totales de CO ₂ excluyendo LULUCF y su cambio desde 1990 (%).	99
Figura 29. Emisiones totales de CO ₂ excluyendo LULUCF (Mt CO ₂ e).	99
Figura 30. Emisiones de CO ₂ per cápita (t CO ₂ e/habitante).	100
Figura 31. Emisiones de la agricultura (Mt CO ₂ e).	100
Figura 32. Emisiones de energía en edificios (Mt CO ₂ e).	101
Figura 33. Emisiones fugitivas del sector energía.	101
Figura 34. Emisiones de combustión industrial en el sector energía	102
Figura 35. Emisiones de procesos industriales.	102
Figura 36. Emisiones de la industria eléctrica.	103
Figura 37. Emisiones del sector transporte (Mt CO ₂ e).	103
Figura 38. Emisiones por deforestación (LULUCF).	104
Figura 39. Tierras forestales: dinámica sumidero/fuente.	104
Figura 40. Emisiones vinculadas a suelos orgánicos.	105
Figura 41. Componente ‘otras tierras’ del LULUCF.	105
Figura 42. Total emisiones netas LULUCF excluyendo incendios no tropicales.	106

Figura 43. Intensidad de carbono del PIB (PPA 2021).	106
Figura 44. Intensidad de carbono del PIB (dólares constantes 2015)	107
Figura 45. Emisiones de gases fluorados de procesos industriales. .	107
Figura 46. Intensidad energética de la economía.	108
Figura 47. Emisiones de N ₂ O desde 1990 (% de cambio).	108
Figura 48. Emisiones totales de N ₂ O excluyendo LULUCF (Mt CO ₂ e).	109
Figura 49. Extracciones de agua dulce en la agricultura (% del total).....	110
Figura 50. Extracciones de agua dulce para uso doméstico (% del total).....	110
Figura 51. Extracciones de agua dulce en la industria (% del total).	111
Figura 52. Extracciones totales como porcentaje de recursos internos renovables.....	111
Figura 53. Extracciones totales en términos absolutos (miles de millones de m ³).	112
Figura 54. Nivel de estrés hídrico.	112
Figura 55. Precipitación promedio anual (mm/año).	113
Figura 56. Ahorro neto ajustado excluyendo daño por partículas (% del INB).	114
Figura 57. Ahorro neto ajustado excluyendo daño por partículas (US\$ actuales).....	114
Figura 58. Ahorro neto ajustado incluyendo daño por partículas (% del INB).	115
Figura 59. Ahorro neto ajustado incluyendo daño por partículas (US\$ actuales).....	115
Figura 60. Ahorro ajustado por daño por CO ₂ (% del INB).....	116
Figura 61. Ahorro ajustado por daño por CO ₂ (US\$ actuales).	116
Figura 62. Ahorro ajustado por consumo de capital fijo (% del INB).	117
Figura 63. Ahorro ajustado por consumo de capital fijo (US\$ actuales).....	117
Figura 64. Ahorro ajustado por gasto en educación (% del INB).....	118
Figura 65. Ahorro ajustado por gasto en educación (US\$ actuales).	118

Figura 66. Ahorro ajustado a partir del ahorro bruto (% del INB). ..	119
Figura 67. Ahorro ajustado por agotamiento de minerales (% del INB).	119
Figura 68. Ahorro ajustado por agotamiento de minerales (US\$ actuales).	120
Figura 69. Ahorro ajustado por agotamiento neto forestal (% del INB).	120
Figura 70. Ahorro ajustado por agotamiento neto forestal (US\$ actuales).	121
Figura 71. Ahorro ajustado a partir del ahorro nacional neto (% del INB).	121
Figura 72. Ahorro ajustado por daño por emisiones de partículas (% del INB).	122
Figura 73. Especies de aves amenazadas (número).	123
Figura 74. Número de especies de peces amenazadas.	123
Figura 75. Serie histórica del ISSA de El Salvador, 1970–2024 (escala 0–1).	126
Figura 76. Puntajes por dimensión FMPEIR normalizados (0–1) para El Salvador, 2000–2024.	129
Figura 77. Perfil radar FMPEIR de El Salvador, 2023 (escala 0–1 por dimensión).	130
Figura 78. ISSA de El Salvador: serie histórica 2000–2023.	133
Figura 79. Dispersión pendiente estandarizada (Z-score global) versus R ² para los 89 indicadores ambientales de El Salvador (2000–2024).	136
Figura 80. Matriz de cuatro cuadrantes: Intensidad del cambio (pendiente estandarizada Z) versus robustez estadística (R ²) para los 89 indicadores ambientales.	138

Introducción

En 2012, la Universidad Tecnológica de El Salvador (UTEC) presentó a la comunidad académica y nacional el *Libro Verde UTEC: Estado del medioambiente y perspectiva de sostenibilidad*. Aquella obra constituyó un hito institucional: representó el esfuerzo sistemático por compilar evidencia, ordenar diagnósticos y formular orientaciones estratégicas en torno a los principales desafíos ambientales del país. En un contexto regional aún marcado por enfoques sectoriales y fragmentados, el Libro Verde ofreció una visión integradora que vinculaba estado ambiental, impactos y respuestas de política, inspirada en las metodologías de evaluación ambiental integral promovidas por organismos internacionales.

Más de una década después, El Salvador enfrenta un escenario ambiental más complejo, más interdependiente y, en muchos aspectos, más crítico. El cambio climático se ha intensificado; la degradación de suelos, el estrés hídrico y la pérdida de biodiversidad han acentuado su carácter estructural; y las presiones demográficas y territoriales se han complicado en un contexto de urbanización acelerada y transformación productiva. Al mismo tiempo, el país ha avanzado en ámbitos estratégicos como la transición energética, lo que genera nuevas oportunidades para articular sostenibilidad ambiental y competitividad económica.

Esta nueva obra no constituye una simple actualización estadística del diagnóstico de 2012, sino una evolución conceptual y metodológica de su enfoque. Mientras que la edición anterior se apoyaba en una evaluación ambiental integral de carácter descriptivo y programático, la presente adopta explícitamente el modelo FMPEIR, incorporando una perspectiva causal y sistémica que permite comprender las interrelaciones dinámicas entre los factores estructurales de degradación, los estados biofísicos observables, sus impactos socioeconómicos y las respuestas institucionales vigentes.

Esta transición metodológica refleja también una actualización académica de los datos. La obra dialoga con los desarrollos contemporáneos de la ciencia de la sostenibilidad, incluyendo los límites planetarios, la resiliencia socioecológica y la economía ecológica, y sitúa el caso salvadoreño dentro de los debates globales sobre sostenibilidad fuerte, gobernanza ambiental y transformación estructural. Así, el diagnóstico nacional se inserta en un marco analítico que trasciende lo descriptivo para abordar dimensiones causales, institucionales y prospectivas.

Un elemento distintivo de esta investigación es su carácter prospectivo. Más allá de describir tendencias, se buscó construir escenarios posibles hacia el mediano y largo plazo, identificar trayectorias alternativas y examinar sus implicaciones para la sostenibilidad del país. Esta orientación responde a la convicción de que la gestión ambiental contemporánea no puede limitarse a reaccionar ante la degradación existente: debe anticipar riesgos, modelar futuros plausibles y diseñar políticas basadas en evidencia.

Con esta investigación, la UTEC reafirma su compromiso con la generación de conocimiento aplicado al servicio del país. La investigación ambiental no es, en este contexto, un ejercicio académico aislado, sino una herramienta para la toma de decisiones públicas y privadas, para la formación de profesionales con conciencia ecológica y para la construcción de un modelo de desarrollo compatible con los límites biofísicos del territorio.

Herederero del espíritu del Libro Verde 2012, este libro se proyecta como una segunda generación de análisis ambiental institucional. Mantiene la vocación de síntesis y orientación estratégica que caracterizó a su antecesor, pero incorpora una mayor sofisticación metodológica, una base teórica más robusta y una perspectiva prospectiva orientada a la transformación estructural.

En un país de alta densidad poblacional, recursos naturales limitados y elevada vulnerabilidad climática, la sostenibilidad no es una opción programática: es una condición de viabilidad histórica. Con esta obra, la UTEC ofrece una contribución académica rigurosa para comprender los desafíos ambientales contemporáneos y orientar las decisiones que definirán el horizonte ecológico y socioeconómico de las próximas décadas.

Capítulo 1. Situación actual del medioambiente en El Salvador: Línea de base empírica

El Salvador enfrenta en el segundo cuarto del siglo XXI una condición de estrés ambiental estructural que es el resultado acumulado de décadas de uso intensivo y escasamente planificado de su territorio, de una densidad demográfica sin paralelo en el continente americano y de una exposición creciente a perturbaciones climáticas cuya frecuencia e intensidad se han incrementado de manera sostenida. Con una extensión de apenas 21,041 km², una población de 6.5 millones de habitantes y una densidad superior a los 300 habitantes por km², la más alta del continente americano y la segunda del hemisferio occidental, solo superada por Haití, El Salvador condensa en un espacio territorial mínimo una combinación de presiones demográficas, económicas y ecológicas que hacen de su caso ambiental uno de los más complejos y documentados de América Latina. Esta condición no es nueva: el país inició su proceso de degradación ecosistémica acelerada en la segunda mitad del siglo XX, asociada a la expansión de la frontera agrícola, la industrialización de las tierras bajas y la concentración urbana en la cuenca del río Acelhuate. Lo que distingue el momento actual es la magnitud acumulada de los pasivos ambientales y la convergencia con las presiones del cambio climático, que amplifican la vulnerabilidad de un sistema que ya operaba cerca de sus límites biofísicos.

La línea de base empírica que construye este capítulo se nutre de fuentes de información de cuatro niveles de origen institucional: las estadísticas nacionales generadas por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA) y el Banco Central de Reserva (BCR); las series regionales de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) y su plataforma CEPALSTAT, que permiten situar los indicadores salvadoreños

en el contexto centroamericano y latinoamericano; las estadísticas globales de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), especialmente el portal FAOSTAT y el módulo de recursos forestales, pesqueros y uso del suelo, el Banco Mundial (BM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD); y la literatura científica revisada por pares publicada en el período 2018–2024 sobre componentes específicos del sistema ambiental salvadoreño. Esta multiplicidad de fuentes responde a una necesidad metodológica: ninguna fuente individual cubre de manera suficiente todos los componentes del FMPEIR con resolución temporal y sectorial comparable, por lo que la triangulación entre fuentes es una exigencia de rigor y no una opción. El capítulo se organiza en cuatro secciones que cubren el estado de los componentes ambientales, los impactos sobre el bienestar humano y los ecosistemas, las respuestas institucionales vigentes y una síntesis integradora. Para cada subsección se presenta una tabla de indicadores clave con valores de referencia, período de observación, fuente primaria e interpretación diagnóstica en el contexto del perfil ambiental nacional.

1.1 Estado de los componentes ambientales

El componente de estado en el modelo FMPEIR describe la condición actual de los sistemas naturales, independientemente de sus causas, que corresponden a las fuerzas motrices y presiones, o sus consecuencias sobre el bienestar humano, que corresponden a los impactos. Para El Salvador, la caracterización del Estado biofísico revela un sistema bajo presión severa en sus cuatro componentes principales: los recursos hídricos, los ecosistemas terrestres, el clima y la energía, y la gestión de residuos. Los indicadores disponibles permiten una caracterización con resolución creciente, aunque persisten lagunas de información en subsectores específicos, especialmente la calidad del suelo a escala municipal y la condición de los ecosistemas marinos y costeros, que constituyen en sí mismas una señal de la debilidad institucional del sistema de monitoreo ambiental.

1.1.1 Recursos hídricos y calidad del agua

El Salvador presenta una disponibilidad hídrica per cápita que la FAO estima en 1,418 m³/habitante/año para 2022 (FAOSTAT, 2023), valor que se sitúa por debajo del umbral de 1,700 m³/hab/año internacionalmente reconocido como indicativo de estrés hídrico estructural, y muy por debajo de los 3,400 m³/hab/año que definen el umbral de vulnerabilidad hídrica según los criterios del Panel Intergubernamental sobre el Agua (OCDE, 2012). En perspectiva regional, Nicaragua disponía en el mismo año de 24,800 m³/hab/año, Costa Rica de 23,600 y Honduras de 11,400, lo que subraya la posición crítica de El Salvador en el contexto centroamericano (CEPALSTAT, 2023). Esta escasez relativa no responde exclusivamente a condiciones hidrológicas naturales: el régimen de precipitaciones del país, que oscila entre los 1,800 y 2,200 mm anuales en las regiones costeras y hasta los 1,200–1,400 mm en el Corredor Seco, es en principio suficiente para garantizar la disponibilidad hídrica si los ecosistemas reguladores, bosques de cuencas, suelos con alta infiltración, humedales, funcionan adecuadamente. El problema central es que la degradación de esos ecosistemas reguladores ha reducido drásticamente la capacidad de retención y regulación del ciclo hídrico: con el 74 % de las principales áreas de recarga hídrica sin cobertura forestal, una proporción creciente de las precipitaciones se convierte en escorrentía superficial que genera inundaciones en la época lluviosa y déficit hídrico en el estiaje, sin recargar los acuíferos que abastecen a la población durante los meses secos.

La extracción de agua dulce, medida como el porcentaje de los recursos hídricos internos renovables que se extrae anualmente, alcanzó el 13,2 % en 2021 según CEPALSTAT (indicador Objetivos de Desarrollo Sostenible, ODS 6.4.2), un valor que en términos nacionales parece moderado, pero que oculta asimetrías territoriales críticas. En las cuencas del Área Metropolitana de San Salvador, donde se concentra el 30 % de la población nacional en menos del 5 % del territorio, los índices de extracción locales superan ampliamente el umbral de estrés hídrico severo (> 40 %), especialmente durante los meses de estiaje, cuando los aportes fluviales se reducen un 70–80 % respecto al período lluvioso. La fuente

más importante de agua superficial es el río Lempa, que drena el 51 % del territorio nacional y abastece el 60 % de la demanda de agua potable del Gran San Salvador; su gestión está condicionada por acuerdos transfronterizos con Guatemala y Honduras, dado que el 47 % de su cuenca se encuentra fuera del territorio salvadoreño.

La dimensión cualitativa del recurso hídrico es igualmente crítica y en varios indicadores más grave que la dimensión cuantitativa. El MARN estima que apenas el 13 % de las aguas residuales domésticas recibe tratamiento adecuado antes de ser descargadas a los cuerpos receptores (indicador ODS 6.3.1, 2020), frente a un promedio regional de América Latina del 41 % (CEPAL, 2023). Esta brecha sitúa a El Salvador entre los países con los más bajos indicadores de tratamiento de aguas residuales de la región. El programa de monitoreo del MARN toma muestras en 122 sitios distribuidos en 55 ríos del territorio nacional, evidenciando que ninguno de los ríos monitoreados alcanza la categoría de calidad buena o excelente; la gran mayoría se clasifica entre regular y muy mala, con los ríos Acelhuate, Sucio, Suquiapa y Grande de San Miguel concentrando los niveles más críticos de contaminación por descargas de aguas negras domésticas, vertidos industriales y escorrentía agrícola con agroquímicos. Datos recientes documentan la presencia de contaminantes emergentes, plaguicidas organoclorados, productos farmacéuticos y microplásticos, en el río Lempa y el embalse del Cerrón Grande, principal fuente de abastecimiento del Gran San Salvador, lo que añade una dimensión de riesgo sanitario emergente que los sistemas de monitoreo convencionales no detectan. La CEPAL (2023) estima que El Salvador requeriría invertir USD 7,855 millones entre 2020 y 2030 —equivalentes a USD 714 millones anuales, o el 2,4 % del Producto Interno Bruto (PIB)— para alcanzar las metas del ODS 6, frente a los USD 30.4 millones ejecutados anualmente en el período reciente, una brecha de financiamiento de 23 a 1.

Tabla 1. Indicadores de recursos hídricos y calidad del agua — El Salvador

Indicador	Valor / Estado	Año ref.	Fuente
Recursos hídricos internos renovables per cápita	1,418 m ³ /hab/año	2022	FAO / FAOSTAT 2023
Umbral estrés hídrico estructural (referencia)	< 1,700 m ³ /hab/año	—	FAO / OCDE
Extracción de agua dulce (% recursos renovables)	13,2 % (ODS 6.4.2)	2021	CEPALSTAT 2023
Promedio Centroamérica extracción	4.8 %	2021	CEPALSTAT 2023
Tratamiento de aguas residuales domésticas	13 % (ODS 6.3.1)	2020	CEPAL 2023
Promedio ALC — tratamiento aguas residuales	41 %	2021	CEPAL / ONU Estadística
Sitios de monitoreo de calidad hídrica	122 sitios, 55 ríos	2021	MARN 2021
Ríos con calidad buena o excelente	0 % de los monitoreados	2021	MARN 2021
Acceso a agua potable básica (urbana)	~94 %	2022	JMP / CEPALSTAT
Acceso a agua potable básica (rural)	~87 %	2022	JMP / CEPALSTAT
Acceso a saneamiento gestionado seguro	Rezago severo (sin dato)	2022	ODS 6.2.1 / JMP
Masa de agua con buena calidad ambiental	51 %	2023	ODS 6.3.2 / Banco Mundial
Inversión requerida para ODS 6 (2020–2030)	USD 7,855 M (714 M/año)	2023	CEPAL 2023
Inversión ejecutada promedio anual (reciente)	USD 30.4 millones/año	2022	CEPAL 2023
Aporte del río Lempa a la demanda AMSS	~60 %	2022	ANDA / MARN
Contaminantes emergentes detectados	Plaguicidas, fármacos, microplásticos (Lempa)	2023	Martínez et al. 2023

1.1.2 Cobertura forestal, uso del suelo y degradación edáfica

La situación de los ecosistemas terrestres salvadoreños es el resultado más visible de la presión acumulada del uso del suelo durante el siglo XX. Según los datos del módulo de recursos forestales de la FAO (Global Forest Resources Assessment, 2020), El Salvador cuenta con 724,000 hectáreas de superficie forestal, que incluyen bosques naturales, plantaciones y sistemas agroforestales como cafetales bajo sombra, equivalentes al 34,4 % de la superficie terrestre total. Esta cifra representa una contracción notable respecto al 61 % de cobertura estimado para 1960, lo que implica la pérdida de aproximadamente 560,000 hectáreas en seis décadas. El ritmo de pérdida neta de bosques fue de -21,700 hectáreas anuales entre 2000 y 2020 según el BM (2021), con tasas que se moderaron respecto a décadas anteriores, pero sin revertir la tendencia estructural de deterioro. En perspectiva regional, la cobertura forestal salvadoreña del 34 % contrasta con el 46% de Honduras, el 50 % de Nicaragua y el 59% de Costa Rica (FAO, 2020), lo que posiciona al país como el de menor cobertura relativa de América Central.

La heterogeneidad de la cobertura forestal dentro del territorio nacional es tan importante como los promedios nacionales. El 74 % de las principales áreas de recarga hídrica carece de cualquier cobertura forestal, el 42 % de las zonas identificadas como propensas a deslizamientos no tiene protección vegetal, y el 67 % de los márgenes de los principales ríos, franjas de ribera que son ecosistemas de alta biodiversidad y función hidrológica crítica, carece de vegetación arbórea (BM, 2021). Esta distribución espacial de la deforestación convierte al problema forestal en un multiplicador sistémico de riesgos: amplifica las inundaciones al incrementar la escorrentía superficial en un 30–50 %, reduce la recarga de acuíferos y potencia los deslizamientos. Según FAOSTAT (2023), la producción de madera en rollo en El Salvador sumó 5.1 millones de m³ en 2022, de los cuales el 87 % correspondió a leña para uso doméstico, proporción que refleja la persistencia de la biomasa como combustible energético en los hogares de menores ingresos y constituye una de las principales fuerzas motrices de la deforestación.

La degradación del suelo agrícola es el fenómeno más silencioso y de mayor impacto económico acumulado del perfil ambiental salvadoreño. Los datos del MAG, validados por las estimaciones de erosión de la FAO (FAOSTAT, 2023), indican que más del 50 % del territorio presenta algún grado de erosión hídrica, con una pérdida estimada de 59 millones de toneladas métricas de suelo por año. El 75 % del territorio agrícola exhibe problemas serios de erosión. Esta pérdida edáfica tiene consecuencias sistémicas que trascienden la productividad agrícola directa: el suelo erosionado transporta nutrientes, sedimentos y agroquímicos hacia los cuerpos de agua, contribuyendo simultáneamente a la contaminación hídrica y a la sedimentación de los embalses hidroeléctricos, cuya productividad se reduce a medida que disminuye la profundidad y el volumen útil. El ahorro ajustado neto, indicador del BM que descuenta del ahorro bruto el valor de los recursos naturales consumidos y los daños por contaminación, arrojó valores negativos en varios años del período 2000–2024 para El Salvador, indicando que la economía estaba consumiendo capital natural sin reponerlo, una señal macroeconómica de insostenibilidad que los indicadores convencionales de PIB no capturan.

Tabla 2. Indicadores de cobertura forestal, uso del suelo y degradación edáfica — El Salvador

Indicador	Valor / Estado	Año ref.	Fuente
Superficie forestal total	724,000 ha (34,4 % del territorio)	2020	FAO FRA 2020
Cobertura forestal 1960 (referencia histórica)	~61 % del territorio	1960	Banco Mundial 2021
Tasa neta de pérdida forestal anual	-21,700 ha/año	2000–2020	Banco Mundial 2021
Tasa de cambio forestal anual (%)	-2,6 % anual	2001–2018	Banco Mundial 2021
Cobertura forestal Costa Rica (referencia regional)	59,4 %	2020	FAO FRA 2020
Cobertura forestal Honduras (referencia regional)	46,0 %	2020	FAO FRA 2020
% áreas de recarga hídrica sin cobertura forestal	74 %	2021	Banco Mundial 2021
% zonas de deslizamiento sin cobertura	42 %	2021	Banco Mundial 2021

% márgenes de ríos sin vegetación arbórea	67 %	2021	Banco Mundial 2021
Producción total de madera en rollo	5.1 millones m ³	2022	FAOSTAT 2023
Proporción como leña para consumo doméstico	87 % del total extraído	2022	FAOSTAT 2023
Territorio con algún grado de erosión	> 50 %	2021	MAG / FAO
Territorio agrícola con erosión severa	75 %	2021	MAG / FAO
Pérdida anual de suelo por erosión hídrica	59 millones t/año	2020	MAG / FAO FAOSTAT
Bosques naturales primarios (% territorio original)	< 2 %	2020	FAO FRA 2020
Pérdidas económicas anuales por deforestación	USD 215 millones/año (≈ 1 % PIB)	2021	Banco Mundial 2021

1.1.3 Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y estructura energética

El perfil de emisiones de El Salvador está determinado por dos características estructurales que lo diferencian del patrón latinoamericano típico: la ausencia de industria pesada y minería intensivas en energía y la alta participación de fuentes renovables en la generación eléctrica. Las emisiones totales de CO₂ per cápita se situaron en 1.22 toneladas por habitante en 2022 según el BM, uno de los valores más bajos de la región y notablemente inferior al promedio latinoamericano de 2.6 t CO₂/hab/año (CEPALSTAT, 2023). En términos absolutos, las emisiones nacionales de CO₂ sumaron 7.9 Mt en 2022, representando el 0,04 % de las emisiones globales (Contribución Determinada a Nivel Nacional, NDC, El Salvador, 2022). Esta baja huella per cápita no debe interpretarse como ausencia de desafío climático: en primer lugar, porque la trayectoria de emisiones muestra crecimiento sostenido, las emisiones totales se han incrementado un 47 % entre 1990 y 2022 según CEPALSTAT, impulsadas principalmente por el transporte; en segundo lugar, porque El Salvador es uno de los países del mundo con mayor vulnerabilidad climática per cápita, lo que crea una situación de injusticia climática estructural: contribuye con menos del 0,05 % de las emisiones globales, pero soporta desproporcionadamente las consecuencias del calentamiento global.

Las emisiones de GEI del sector energético, el mayor emisor sectorial, suman aproximadamente 8.4 Mt CO₂e anuales, con el transporte como principal fuente (44 % del consumo final de energía y 55–60 % de las emisiones del sector según la NDC). El sector agricultura, ganadería, silvicultura y otros usos del suelo (AFOLU) aporta adicionalmente emisiones relevantes de metano (CH₄) por la fermentación entérica del ganado y de óxido nitroso (N₂O) por la aplicación de fertilizantes nitrogenados, cuya cuantificación presenta mayor incertidumbre metodológica que las emisiones de CO₂ por combustión. La intensidad de carbono del PIB, toneladas de CO₂ por millón de USD de PIB, ha mostrado una tendencia de reducción en el período 2000–2023, coherente con el desacoplamiento relativo entre crecimiento económico y emisiones energéticas que la transición renovable en el sector eléctrico ha facilitado. Sin embargo, este desacoplamiento relativo no se ha traducido en desacoplamiento absoluto: las emisiones totales continúan creciendo en valores absolutos, impulsadas por la motorización del transporte.

La transición energética renovable en el sector eléctrico constituye el avance ambiental más documentado y estadísticamente sólido del período analizado. Según datos de la Dirección General de Energía, Hidrocarburos y Minas (DGEHM, 2024), en 2023 se inyectaron a la red eléctrica nacional 7,387.9 GWh, de los cuales el 61.5 % provino de fuentes renovables: hidroeléctrica (21 %), geotérmica (20 %), solar (7,3%), biomasa (7,2 %) y eólica (2,3 %). La capacidad instalada total alcanzó 2,997.69 MW en 2023. La energía solar fotovoltaica, que en 2017 representaba apenas el 1,45 % de la generación, ha escalado hasta 633.10 MW instalados, a punto de superar la capacidad hidroeléctrica históricamente dominante. El acceso a electricidad ha alcanzado el 98,5 % de los hogares (CEPALSTAT, 2023), con la brecha residual concentrada en comunidades rurales dispersas. El acceso a combustibles limpios para cocinar supera el 93 % en zonas urbanas, pero permanece en el 60–65 % en zonas rurales, donde la leña continúa siendo el combustible principal con los impactos asociados sobre la salud respiratoria y los ecosistemas forestales.

Tabla 3. Indicadores de emisiones de GEI, energía y calidad del aire — El Salvador

Indicador	Valor / Estado	Año ref.	Fuente
Emisiones CO ₂ totales	7.9 Mt CO ₂	2022	Banco Mundial / CEPALSTAT
Emisiones CO ₂ per cápita	1.22 t CO ₂ /hab/año	2022	Banco Mundial 2023
Promedio América Latina CO ₂ per cápita	2.6 t CO ₂ /hab/año	2022	CEPALSTAT 2023
Emisiones totales GEI (incluyendo AFOLU)	~11.5 Mt CO ₂ e	2021	NDC El Salvador 2022
Variación emisiones CO ₂ respecto a 1990	+47 %	2022	CEPALSTAT 2023
Participación en emisiones globales	0,04 %	2022	NDC El Salvador 2022
Índice de renovabilidad eléctrica (2023)	61,5 %	2023	UT 2024
Generación total inyectada a la red	7,387.9 GWh	2023	UT 2024
Capacidad instalada solar FV	633.10 MW	2023	UT 2024
Capacidad instalada total	2,997.69 MW	2023	UT 2024
Acceso a electricidad (total)	98,5 %	2022	CEPALSTAT 2023
Acceso a combustibles limpios para cocinar (urbano)	> 93 %	2022	Banco Mundial / JMP
Acceso a combustibles limpios para cocinar (rural)	60–65 %	2022	Banco Mundial / JMP
Consumo final de energía: participación del transporte	44 %	2022	SIEE-OLADE / UT
Meta NDC: reducción emisiones sector energético 2030	-640 Kt CO ₂ e respecto a 2019	2022	NDC El Salvador 2022

1.1.4 Residuos sólidos y saneamiento

La gestión de los residuos sólidos urbanos representa una de las dimensiones ambientales con mayor brecha entre la magnitud del problema y el nivel de atención institucional que ha recibido. El Salvador genera entre 0.8 y 1.0 kg de residuos sólidos por habitante por día según estimaciones del MARN, lo que implica una producción total na-

cional de entre 5,000 y 6,500 toneladas diarias. Según datos de la CEPAL (CEPALSTAT, 2023), la generación per cápita se ha incrementado a una tasa del 1.2–1,5 % anual en el período 2010–2022, asociada al crecimiento del ingreso disponible y a los cambios en los patrones de consumo que acompañan la urbanización. La composición de los residuos sigue siendo predominantemente orgánica (55–60 %), lo que representa una oportunidad de valorización mediante compostaje o biogás que no está siendo aprovechada sistemáticamente. Los plásticos (15–18 %) y el papel y cartón (10–12 %) constituyen las fracciones recuperables más relevantes, con una tasa de reciclaje formal estimada por el MARN en menos del 5 % del total generado, frente al 14,4 % del promedio latinoamericano reportado por la CEPAL (2023).

Los sistemas de recolección presentan coberturas heterogéneas que reflejan las desigualdades territoriales del país: satisfactorias en el área metropolitana y en los distritos urbanos medianos, pero con brechas significativas en los 137 distritos rurales menores y en las zonas periurbanas de crecimiento acelerado. La disposición final sigue dependiendo del relleno sanitario de Nejapa para el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), que opera con una vida útil reducida y enfrenta problemas de capacidad de largo plazo, y de una red de rellenos de capacidad limitada y botaderos a cielo abierto para el resto del país. El MARN identifica más de 650 sitios de disposición no controlada activos a nivel nacional, que generan lixiviados que contaminan suelos y acuíferos superficiales. La problemática tiene una concentración territorial marcada: el 86 % de los desechos se genera en los seis departamentos más densamente poblados del país, lo que facilita la planificación de infraestructura, pero también concentra los pasivos ambientales en las zonas de mayor presión sobre los recursos.

Tabla 4. Indicadores de gestión de residuos sólidos y saneamiento — El Salvador

Indicador	Valor / Estado	Año ref.	Fuente
Generación per cápita de residuos sólidos	0.8–1.0 kg/hab/día	2022	MARN / CEPALSTAT
Generación total nacional diaria	5,000–6,500 t/día	2022	MARN 2023
Tasa de crecimiento anual de la generación	+1.2–1,5 %/año	2010–2022	CEPALSTAT 2023
Composición: fracción orgánica	55–60 % del total	2022	MARN 2022
Composición: plásticos	15–18 % del total	2022	MARN 2022
Tasa de reciclaje formal (estimación)	< 5 %	2022	MARN 2023
Promedio ALC — tasa de reciclaje formal	14,4 %	2022	CEPAL 2023
Sitios de disposición no controlada activos	> 650	2023	MARN 2023
Concentración generación (6 deptos. más densos)	86 % del total nacional	2022	MARN 2022
Tratamiento de aguas residuales domésticas	< 20 %	2020	CEPAL / MARN
Acceso a saneamiento básico (total)	~90 %	2022	JMP 2023
Acceso a saneamiento mejorado (rural)	~81 %	2022	JMP 2023
Inversión en gestión residuos (% gasto público)	Inferior al 0,3 %	2022	CEPAL 2023

1.1.5 Estructura sociodemográfica y vulnerabilidad climática

La vulnerabilidad climática de El Salvador no es solo una función de su exposición geofísica a amenazas naturales, sino también, y de manera determinante, de las características sociodemográficas y económicas que condicionan la sensibilidad del sistema humano a esas amenazas y su capacidad de adaptación. Con una densidad poblacional de 307 hab/km² en 2023 (CEPALSTAT, 2023) y una tasa de urbanización del 74 %, con la proyección de alcanzar el 80 % para 2035, El Salvador enfrenta una combinación de alta exposición y limitada capacidad adaptativa que los índices de vulnerabilidad climática capturan con consistencia. El país ocupa el puesto 77 en el Índice Global de Riesgo Climático de

Germanwatch (2025), posición que refleja las pérdidas económicas y humanas acumuladas por eventos extremos en las dos décadas previas, con un promedio de 1.22 muertes por 100,000 habitantes atribuibles a desastres climáticos y pérdidas equivalentes al 1,37 % del PIB anual en el período 2003–2022 (datos más recientes disponibles).

La exposición geofísica del país es estructuralmente alta por múltiples tipos de amenaza simultáneas. El MARN estima que el 10 % del territorio es propenso a inundaciones, el 20 % a deslizamientos de tierra y el 50 % puede verse afectado por sequía en alguna magnitud. El Corredor Seco centroamericano, que afecta los departamentos orientales y centrales de El Salvador, concentra las mayores vulnerabilidades ante las sequías asociadas al fenómeno de El Niño, con períodos secos intraestacionales (las llamadas canículas) que se han intensificado en duración e intensidad desde la década de 2000. Según datos de la CEPAL (2023), los costos de los desastres naturales en América Central promedian entre el 1 y el 3 % del PIB anual, con El Salvador en la parte alta de ese rango por la combinación de alta densidad de activos expuestos y ecosistemas reguladores degradados. Las proyecciones según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), en su Sexto Informe de Evaluación (AR6, 2022) para América Central indican un calentamiento de 1.5–2.5 °C adicionales para 2050 bajo escenarios de emisiones medias (SSP2-4.5), con reducción de la disponibilidad hídrica del 10–30 % en las cuencas del Pacífico y mayor frecuencia de eventos de precipitación extrema, factores que amplificarán todas las vulnerabilidades ya documentadas.

Tabla 5. Indicadores demográficos, climáticos y de vulnerabilidad territorial — El Salvador

Indicador	Valor / Estado	Año ref.	Fuente
Población total	6.5 millones de habitantes	2023	CEPALSTAT 2023
Densidad poblacional	307 hab/km ²	2023	CEPALSTAT 2023
Densidad poblacional Honduras (referencia regional)	84 hab/km ²	2023	CEPALSTAT 2023
Tasa de urbanización	74 %	2023	CEPALSTAT 2023

Proyección tasa urbanización 2035	~80 %	2035	CEPAL/ONU-DESA 2022
Posición Índice Riesgo Climático (IRC Germanwatch)	Puesto 17 de 180 países	2023	Germanwatch 2023
Muertes atribuibles a desastres climáticos	1.22 por 100,000 hab/año	2003–2022	Germanwatch 2023
Pérdidas anuales por desastres (% PIB)	1,37 % del PIB (promedio)	2003–2022	Germanwatch 2023
Territorio propenso a inundaciones	10 %	2021	MARN / Banco Mundial
Territorio propenso a deslizamientos	20 %	2021	MARN / Banco Mundial
Territorio potencialmente afectado por sequía	50 %	2021	MARN / Banco Mundial
Proyección calentamiento adicional a 2050 (SSP2-4.5)	+1.5–2.5 °C	2022	IPCC AR6 2022
Proyección reducción disponibilidad hídrica 2050	-10 a -30 %	2022	IPCC AR6 2022
Superficie del país bajo 1 m sobre el nivel del mar	~3 %	2022	Banco Mundial / MARN

1.2 Principales impactos ambientales

Los impactos de la degradación ambiental en El Salvador operan simultáneamente en tres planos que se retroalimentan: el plano sanitario, que afecta directamente la salud y el bienestar de la población; el plano económico, que reduce la productividad de los sistemas agropecuarios y genera costos de infraestructura recurrentes; y el plano ecosistémico, que degrada los servicios que los sistemas naturales proveen y que sustentan tanto la economía como el bienestar humano de largo plazo. La comprensión de estos impactos en su dimensión interconectada es esencial para el diseño de políticas ambientales que aborden las causas y no solo los síntomas.

1.2.1 Impactos sobre la salud pública

La contaminación ambiental genera una carga de enfermedad documentada y cuantificable sobre la población salvadoreña. La contaminación de fuentes de agua superficiales y subterráneas se asocia directamente a la persistencia de enfermedades gastrointestinales de transmisión hídrica: según datos del Ministerio de Salud (MINSAL) y CEPALSTAT, la diarrea aguda es la primera causa de consulta ambulatoria en menores de cinco años en los departamentos del Corredor Seco y en las zonas periurbanas con acceso deficiente a agua potable, con tasas de incidencia que duplican el promedio urbano. La mortalidad atribuible a enfermedades diarreicas relacionadas con el agua no segura se situó en 3.8 muertes por 100,000 habitantes en 2020 para El Salvador, frente a 1.2 en Costa Rica y 6.7 en Honduras (OMS/OPS/CEPALSTAT, 2022), ubicando al país en una posición intermedia que refleja los avances en cobertura de agua potable, pero también las persistentes brechas en calidad y tratamiento. La exposición a plaguicidas organoclorados en zonas de producción agrícola intensiva, especialmente en el Bajo Lempa y las zonas de cultivo de caña de azúcar, genera riesgos documentados de intoxicación crónica, daño renal y efectos endocrinos. La contaminación del aire en el AMSS, con concentraciones de PM_{2.5} que exceden las guías de la OMS en los corredores viales de mayor densidad vehicular, se asocia a incrementos en la incidencia de enfermedades respiratorias agudas y crónicas, especialmente en grupos de mayor vulnerabilidad como niños y adultos mayores.

Los eventos climáticos extremos generan impactos sobre la salud que van más allá de las víctimas directas por inundaciones y deslizamientos. En los períodos inmediatamente posteriores a inundaciones, el MINSAL registra incrementos del 35–50 % en las consultas por dengue y leptospirosis, enfermedades vectoriales que proliferan en los reservorios de agua estancada que los eventos de inundación crean. Las sequías del Corredor Seco generan pérdidas de cosechas de subsistencia que se traducen en inseguridad alimentaria estacional: según la FAO (2023), el 26 % de los hogares rurales del oriente y centro de El Salvador experimenta inseguridad alimentaria moderada o severa en años de se-

quía pronunciada, con efectos documentados sobre los indicadores de desnutrición infantil que se revierten solo parcialmente en los años de buenas lluvias.

Tabla 6. Indicadores de impactos ambientales sobre la salud pública — El Salvador

Indicador	Valor / Estado	Año ref.	Fuente
Mortalidad por enfermedades diarreicas (agua insegura)	3.8 por 100,000 hab/año	2020	OMS / CEPALSTAT 2022
Mortalidad Costa Rica (referencia comparativa)	1.2 por 100,000 hab/año	2020	OMS / CEPALSTAT 2022
Incidencia de dengue (año epidémico)	240 casos/100,000 hab	2022	MINSAL / PAHO
Incremento enfermedades vectoriales posinundación	+35–50 % en consultas	2022	MINSAL 2022
Hogares rurales con inseguridad alimentaria (año sequía)	26 % moderada o severa	2023	FAO 2023
Concentración PM2.5 en corredores viales AMSS	Excede guías OMS (> 15 µg/m ³)	2022	MARN / OMS
Población expuesta a riesgo por plaguicidas (Bajo Lempa)	~80,000 hab.	2021	MARN / OPS
Tasa de mortalidad infantil atribuible a causas ambientales	Reducción del 43 % en 20 años	2000–2022	Banco Mundial / CEPALSTAT
Acceso a instalaciones básicas de lavado de manos	~80 %	2022	JMP / CEPALSTAT

1.2.2 Impactos económicos

La cuantificación de los costos económicos de la degradación ambiental revela una deuda invisible que los indicadores macroeconómicos convencionales no registran, pero que erosiona silenciosamente el capital productivo del país. El BM (2021) estima pérdidas promedio de USD 215 millones anuales atribuibles exclusivamente a la degradación de los servicios forestales, incluyendo daños amplificados de eventos extremos,

reducción de la productividad hidroeléctrica por sedimentación y pérdidas en la pesca artesanal, equivalentes a casi el 1 % del PIB. Esta cifra es el piso de la estimación: no incluye los costos de la contaminación hídrica sobre la salud pública, el valor de las especies extintas o amenazadas, ni los costos del agotamiento de los acuíferos. El indicador de ahorro genuino ajustado (ANS) del BM, que descuenta del ahorro bruto el consumo de capital fijo, el agotamiento de recursos naturales y los daños por contaminación de CO₂, registró valores negativos para El Salvador en los años en los que el agotamiento de los recursos naturales superó la inversión en capital humano y físico, lo que en términos económicos equivale a decir que el país consumía capital heredado sin generar riqueza equivalente.

Los impactos económicos del cambio climático proyectados por el IPCC y cuantificados por la CEPAL (2023) para el período 2025–2050 añaden una dimensión prospectiva de alta relevancia política. La CEPAL estima que, bajo un escenario de calentamiento de 2 °C, los costos acumulados para El Salvador por pérdidas en productividad agrícola, daños a infraestructura costera y mayor frecuencia de eventos extremos podrían alcanzar el 7–12 % del PIB acumulado al 2050 sin medidas de adaptación, con los sectores agropecuario, pesquero y turístico soportando las cargas más elevadas. La pesca artesanal, que sustenta el 40 % de la proteína animal de los hogares de menores ingresos en las zonas costeras, ya ha experimentado reducciones en las capturas de entre el 15 y el 25 % en la última década, asociadas a la combinación de sobrepesca, degradación de manglares y calentamiento de las aguas costeras (FAO, 2023).

Tabla 7. Indicadores de impactos económicos de la degradación ambiental — El Salvador

Indicador	Valor / Estado	Año ref.	Fuente
Pérdidas anuales por degradación servicios forestales	USD 215 millones/año (≈1 % PIB)	2021	Banco Mundial 2021
Pérdida de suelo agrícola por erosión	59 millones t/año	2020	MAG / FAO FAOSTAT

Ahorro Neto Ajustado (ANS) — años con valor negativo	Varios años 2000–2015	2023	Banco Mundial
Costo proyectado del cambio climático (2025–2050)	7–12% PIB acumulado sin adaptación	2023	CEPAL 2023
Reducción capturas pesca artesanal (última década)	–15 a –25 %	2023	FAO 2023
Pesca artesanal como fuente de proteína (hogares costeros)	~40 % de la proteína animal	2022	FAO 2023
Costos anuales desastres hidrometeorológicos	1,37 % del PIB (promedio)	2003–2022	Germanwatch 2023
Participación sector agropecuario en PIB	~5,1 %	2022	BCR / CEPALSTAT
Pérdidas agropecuarias: años de sequía (ENSO)	Hasta 3,5 % del PIB sectorial	2015; 2019	MAG / CEPAL

1.2.3 Impactos sobre los servicios ecosistémicos

Los servicios ecosistémicos, los beneficios que los sistemas naturales proveen a las sociedades humanas, constituyen la categoría de impacto más difícil de cuantificar, pero de mayor alcance estructural en el perfil ambiental salvadoreño. La regulación hídrica es el servicio más crítico en el contexto de la alta variabilidad climática: los ecosistemas forestales de las cuencas altas del Lempa, el Jiboa y el Grande de San Miguel actúan como esponjas que retienen el agua de lluvia y la liberan gradualmente hacia los ríos y acuíferos durante el estiaje. La deforestación de estas cuencas ha deteriorado severamente este servicio: la reducción de la infiltración incrementa la escorrentía pico en un 30–50 %, agravando las inundaciones en la época lluviosa sin mejorar la disponibilidad hídrica en la seca, y acelerando la sedimentación de los embalses, especialmente el Cerrón Grande, que ha perdido entre el 40 y el 60 % de su capacidad de almacenamiento original por la sedimentación de las últimas décadas según estimaciones de la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL) y la FAO.

Los ecosistemas marino-costeros proveen servicios esenciales que están siendo degradados de manera simultánea por múltiples presiones. Las 35,500 hectáreas de manglares que subsisten en el litoral salvadoreño, según el catastro de la FAO (FAOSTAT, 2023), una reducción del 30 % respecto a la cobertura de 1980, actúan como viveros naturales de las especies marinas que sustentan la pesca artesanal, como barreras de protección costera ante el oleaje y las tormentas, y como sumideros de carbono azul con una capacidad de fijación tres a cinco veces superior a la de los bosques terrestres por unidad de superficie. La degradación de los manglares por el avance de la frontera agrícola, la acuicultura intensiva de camarón y la urbanización costera pone en riesgo simultáneamente la seguridad alimentaria de las comunidades pesqueras, la protección de la infraestructura costera y la capacidad de secuestro de carbono. Los servicios de polinización, esenciales para la productividad de cultivos de subsistencia como el frijol, el maíz y las hortalizas, se ven comprometidos por la fragmentación de los hábitats que redujo las poblaciones de polinizadores silvestres, especialmente en las zonas agrícolas intensivas donde el uso de agroquímicos ha eliminado los refugios de la fauna polinizadora.

Tabla 8. Indicadores de servicios ecosistémicos y biodiversidad — El Salvador

Indicador	Valor / Estado	Año ref.	Fuente
Superficie de manglares	35,500 ha	2022	FAO FAOSTAT 2023
Reducción de manglares respecto a 1980	-30 %	2022	FAO FAOSTAT 2023
Tasa fijación C manglares vs bosques terrestres	3-5× mayor por ha	2022	FAO / IPCC
Pérdida capacidad almacenamiento Cerrón Grande	40-60 % (sedimentación)	2020	CEL / FAO
Reducción escorrentía por deforestación cuencas	+30-50 % escorrentía pico	2021	Banco Mundial 2021
Áreas protegidas (% del territorio terrestre)	~2,5 %	2022	MARN / Banco Mundial
Especies de aves amenazadas (UICN)	Tendencia creciente	2023	UICN / Banco Mundial

Especies de peces amenazadas (UICN)	Tendencia creciente	2023	UICN / Banco Mundial
Valor económico servicios polinización (estimado)	No cuantificado oficialmente	2022	MARN / FAO
Captura pesca artesanal marina	~10,000–12,000 t/año	2022	FAO FAOSTAT 2023
Acuicultura producción (tendencia)	Crecimiento 2010–2022	2022	FAO FAOSTAT 2023

1.2.4 Vulnerabilidad social diferenciada y justicia ambiental

Los impactos de la degradación ambiental se distribuyen de manera profundamente desigual entre la población salvadoreña, siguiendo los contornos de las desigualdades socioeconómicas y territoriales pre-existentes. Esta distribución inequitativa, que la literatura de la ecología política denomina injusticia ambiental, no es accidental: es el resultado de mecanismos sistemáticos que concentran la exposición a las cargas ambientales en los grupos con menor capacidad de evitarlas y menor acceso a los mecanismos de compensación. Las comunidades rurales del Corredor Seco, que dependen directamente de los agroecosistemas para su alimentación y sus ingresos, soportan de manera desproporcionada los impactos de las sequías, la erosión del suelo y la inseguridad alimentaria. El 36 % de los hogares rurales del oriente del país vive por debajo de la línea de pobreza multidimensional (Dirección General de Estadísticas y Censos, DIGESTYC, 2022), condición que reduce su capacidad de inversión en prácticas agrícolas sostenibles, de acceso a sistemas de almacenamiento de agua y de migración adaptativa ante el deterioro ambiental.

Los pescadores artesanales del litoral Pacífico, aproximadamente 15,000 familias cuyo ingreso principal depende de la pesca, enfrentan la combinación de la degradación de los manglares como hábitat de cría, la reducción de los bancos pesqueros por la sobreexplotación y el calentamiento de las aguas costeras, y la competencia de la pesca industrial. Las comunidades ubicadas en zonas de riesgo periurbano, pendientes volcánicas, márgenes de quebradas, zonas inundables en el Área Metropolitana, soportan los mayores costos por eventos extremos y tienen la

menor cobertura de seguros y sistemas de compensación. Según datos de la CEPAL (2023), el 20 % de los hogares de menores ingresos de El Salvador destina entre el 8 y el 12 % de sus ingresos a la compra de agua en situaciones de desabastecimiento, frente a menos del 1 % de los hogares de mayores ingresos, lo que implica una tributación ambiental regresiva que penaliza a los más vulnerables por las consecuencias de un problema cuya causa está distribuida de manera muy diferente.

Tabla 9. Indicadores de vulnerabilidad social diferenciada y justicia ambiental — El Salvador

Indicador	Valor / Estado	Año ref.	Fuente
Pobreza multidimensional en hogares rurales orientales	36 %	2022	DIGESTYC 2022
Familias dependientes de pesca artesanal costera	~15,000 familias	2022	FAO 2023 / CENDEPESCA
Inseguridad alimentaria rural moderada-severa (año sequía)	26 %	2023	FAO 2023
Gasto en agua de hogares de bajo ingreso (desabast.)	8–12 % del ingreso	2022	CEPAL 2023
Gasto en agua de hogares de alto ingreso	< 1 % del ingreso	2022	CEPAL 2023
Comunidades en zonas de riesgo alto periurbano	~250 asentamientos	2021	SNET / MARN
Diferencial de mortalidad infantil rural vs urbano	1.8×	2022	MINSAL / CEPALSTAT
Acceso a saneamiento rural vs. urbano (brecha)	81 % rural vs 97 % urbano	2022	JMP / CEPALSTAT
Mujeres que acarrear agua (zona rural sin acceso)	~70 % de la carga	2021	PNUD / OPS

1.3 Respuestas institucionales: Avances y brechas

Las respuestas institucionales al deterioro ambiental documentado en las secciones anteriores se han desarrollado de manera progresiva y sectorialmente desigual a lo largo del período analizado. La dimensión de Respuesta en el modelo FMPEIR no se limita a las acciones del

Estado: abarca también las respuestas del sector privado, la sociedad civil, la academia y la cooperación internacional. Sin embargo, dado el carácter de bien público de los recursos naturales y la escala de los desafíos identificados, la calidad y efectividad de las respuestas estatales, normativas, institucionales y de inversión pública, determinan en gran medida la trayectoria del sistema en su conjunto.

1.3.1 Marco normativo e institucional

El Salvador ha construido progresivamente desde 1998 un conjunto de instrumentos jurídicos e institucionales que configura un marco normativo ambiental formalmente alineado con los estándares internacionales. La Ley del Medio Ambiente (Decreto Legislativo No. 233, 1998) y su Reglamento General establecen los principios de gestión ambiental, el sistema de evaluación de impacto ambiental y la institucionalidad central del MARN. La Ley General de Recursos Hídricos, aprobada en 2022 tras más de dos décadas de debate legislativo, aporta el marco legal necesario para la gestión integrada del agua, aunque su implementación plena enfrenta desafíos operativos y presupuestarios. La Política Nacional de Medio Ambiente (actualizada en 2022), el Plan Nacional de Cambio Climático 2022–2026 y la Política Nacional Energética 2020–2050 constituyen los instrumentos de planificación de mayor jerarquía, junto con la Contribución Determinada a Nivel Nacional actualizada (NDC, 2022), cuyos compromisos incluyen la reducción de 640 Kt CO₂e en el sector energético para 2030 y la restauración de un millón de hectáreas de bosques como meta forestal emblemática. El proceso de elaboración de la NDC 3.0, iniciado con apoyo del PNUD en 2025, señala la continuidad del ciclo de planificación climática. En el plano institucional, la arquitectura del MARN como autoridad ambiental central, complementada por el SNET para alertas tempranas y el MIDES para la dimensión social de la gestión ambiental, configura un aparato institucional que, a pesar de sus limitaciones de recursos humanos y financieros, ha incrementado su capacidad operativa de manera sostenida en el período analizado.

Tabla 10. Marco normativo e institucional de la gestión ambiental — El Salvador

Instrumento / Institución	Función principal	Año	Estado de implementación
Ley del Medio Ambiente (D.L. No. 233)	Marco jurídico general; sistema de EIA	1998	Vigente y operativa
Ley General de Recursos Hídricos	Gestión integrada del agua	2022	En implementación progresiva
Política Nacional de Medio Ambiente	Marco estratégico ambiental	2022	Vigente; implementación parcial
Plan Nacional de Cambio Climático 2022–2026	Adaptación y mitigación climática	2022	En ejecución con apoyo BID/GIZ
NDC El Salvador (2.a Contribución)	Compromisos París; metas sectoriales 2030	2022	Reportada ante UNFCCC
Política Nacional Energética 2020–2050	Transición energética nacional	2020	Vigente; meta 70 % renovables 2030
MARN	Autoridad ambiental central; monitoreo	1998	Operativo; presupuesto limitado
SNET	Alertas tempranas; meteorología	2001	Operativo; red en expansión
ANDA	Agua potable y saneamiento	1961	Operativo; rezago inversión
Proyecto RECLIMA (Fondo Verde Clima)	Restauración ecosistémica; 1 M ha	2020	En ejecución 2020–2030
NDC 3.0 (en elaboración)	Actualización compromisos climáticos	2025	En formulación con PNUD

1.3.2 Transición energética

La transición energética renovable es la respuesta ambiental con los resultados cuantitativos más sólidos y estadísticamente robustos del período 2000–2024. La combinación de geotermia, hidroelectricidad, energía solar fotovoltaica, biomasa y eólica ha consolidado un índice de renovabilidad que en 2023 alcanzó el 61,5 % de la generación total, con capacidad instalada de fuentes renovables de 2,240.57 MW (UT, 2024).

Este logro posiciona a El Salvador favorablemente en el contexto centroamericano: solo Costa Rica, con su histórica tradición de generación renovable (> 99 %), supera este porcentaje en la región. La expansión acelerada de la energía solar fotovoltaica, de apenas 1.45 % de la generación en 2017 a más del 7,3 % en 2023, con una capacidad instalada de 633.10 MW que en breve superará la capacidad hidroeléctrica, constituye la transformación más rápida y estructuralmente relevante de la matriz. El acceso a electricidad ha alcanzado el 98,5 % de la población, con la brecha residual concentrada en comunidades rurales dispersas. La política de tarifas eléctricas ha mantenido precios relativamente accesibles para los hogares de menores consumos, reduciendo la desigualdad en el acceso al servicio. En el plano de las limitaciones, la descarbonización del transporte permanece como el desafío más urgente y menos atendido: el parque vehicular, que superó los 950,000 vehículos registrados en 2023 (VMT, 2023), con una edad media superior a los 15 años y una composición predominante de vehículos de gasolina de baja eficiencia, es el principal obstáculo para el cumplimiento de las metas de la NDC.

Tabla 11. Indicadores de la transición energética — El Salvador

Indicador	Valor / Estado	Año ref.	Fuente
Índice de renovabilidad eléctrica	61,5 %	2023	UT 2024
Generación total inyectada a la red	7,387.9 GWh	2023	UT 2024
Capacidad instalada total	2,997.69 MW	2023	UT 2024
Capacidad solar fotovoltaica instalada	633.10 MW	2023	UT 2024
Capacidad geotérmica instalada	~204 MW	2023	UT 2024 / LaGeo
Participación hidro en generación	21 %	2023	UT 2024
Acceso a electricidad (hogares)	98,5 %	2022	CEPALSTAT 2023
Acceso combustibles limpios cocina (urbano)	> 93 %	2022	Banco Mundial / JMP

Acceso combustibles limpios cocina (rural)	60–65 %	2022	Banco Mundial / JMP
Parque vehicular registrado	> 950,000 vehículos	2023	VMT 2023
Edad media parque vehicular	> 15 años	2022	VMT / MARN
Participación del transporte en consumo energético	44 %	2022	SIEE-OLADE / UT
Índice renovabilidad Costa Rica (comparativo)	> 99 %	2023	ICE / CEPALSTAT

1.3.3 Restauración ecosistémica, biodiversidad y gestión del riesgo

La respuesta institucional en el ámbito de la restauración ecosistémica ha ganado escala y visibilidad política en el período 2018–2024, impulsada principalmente por el financiamiento internacional vinculado a los compromisos de la NDC y el Convenio sobre la Diversidad Biológica. El proyecto RECLIMA, financiado por el Fondo Verde para el Clima con un presupuesto de USD 110 millones para el período 2020–2030 (FAO, 2025), constituye el mayor programa de restauración ecosistémica ejecutado en el país e integra reforestación, manejo forestal comunitario, conservación de suelos y gestión de cuencas en los departamentos de mayor vulnerabilidad hídrica y climática. El programa Árboles para El Salvador reportó la plantación de más de 50 millones de árboles entre 2019 y 2024, aunque la calidad de la restauración, en términos de supervivencia de las plantas, diversidad de especies y recuperación de las funciones ecosistémicas, no es evaluada sistemáticamente con los mismos estándares aplicados a la cobertura de los compromisos cuantitativos. La meta de restaurar un millón de hectáreas para 2030 es ambiciosa en el contexto territorial del país, equivale al 47 % de la superficie total del territorio, y su viabilidad requiere no solo la plantación de árboles, sino la resolución de los conflictos de tenencia de la tierra y la reducción de los incentivos económicos que hacen más rentable mantener los usos del suelo que generan la deforestación.

En materia de biodiversidad, El Salvador cuenta con el Sistema de Áreas Naturales Protegidas (SANP), que en 2023 abarcaba 122 áreas con algún nivel de protección legal, cubriendo aproximadamente el 2,5 % del

territorio terrestre y el 0,04 % de la zona marino-costera. Esta cobertura está muy por debajo de las metas del Marco Global de Biodiversidad Kunming-Montreal (COP 15, 2022), que establece la protección del 30 % del territorio terrestre y marino para 2030 (Marco 30×30). La gestión efectiva de las áreas protegidas enfrenta limitaciones de presupuesto, personal y capacidad de fiscalización que resultan en lo que la literatura especializada denomina “áreas protegidas de papel”: territorios con protección legal pero sin capacidad operativa de prevenir la invasión, extracción ilegal y degradación. En gestión del riesgo, el SNET ha desarrollado sistemas de alerta temprana para inundaciones y deslizamientos que cubren las principales cuencas hidrológicas, con una cobertura que se ha expandido significativamente desde el impacto del huracán Ida (2021). La planificación territorial basada en riesgo ha avanzado en los municipios que accedieron a programas de apoyo del BID y la Unión Europea, pero su aplicación sistemática a nivel nacional está incompleta.

Tabla 12. Indicadores de respuestas en restauración ecosistémica y gestión del riesgo — El Salvador

Indicador	Valor / Estado	Año ref.	Fuente
Presupuesto proyecto RECLIMA (FVC)	USD 110 millones (2020–2030)	2020	Fondo Verde Clima
Árboles plantados programa nacional (2019–2024)	> 50 millones	2024	MARN 2024
Meta restauración forestal NDC 2030	1 millón de hectáreas	2022	NDC El Salvador 2022
Áreas Naturales Protegidas (SANP)	122 áreas con algún nivel legal	2023	MARN 2023
Cobertura de áreas protegidas (% territorio)	~2,5 % terrestre	2023	MARN / Banco Mundial
Meta Marco Kunming-Montreal 30×30 (2030)	30 % del territorio	2022	COP 15 / CBD
Brecha cobertura protegida vs. meta 30×30	27.5 puntos porcentuales	2023	MARN / CBD
Municipios con planificación territorial basada en riesgo	~40 % del total	2023	VMVDU / SNET

Cobertura sistema alerta temprana hidrológica	Cuencas principales monitoreadas	2023	SNET / MARN
Inversión pública en medioambiente (% PIB)	~0.3–0,5 %	2022	BCR / CEPALSTAT
Promedio ALC inversión ambiental pública (% PIB)	~0.8–1,2 %	2022	CEPAL 2023

1.4 Síntesis: El perfil ambiental de El Salvador

La lectura integrada de la evidencia cuantitativa y cualitativa reunida en este capítulo permite construir un retrato coherente del perfil ambiental salvadoreño que va más allá de la suma de sus componentes sectoriales. El sistema ambiental de El Salvador en el período analizado es un sistema bajo presión estructural severa en sus componentes biofísicos, con una trayectoria de avance genuino en la dimensión de servicios básicos y energía renovable, y con un conjunto de brechas no resueltas que condicionan la sostenibilidad de largo plazo de los logros alcanzados. Los 13 indicadores de las tablas precedentes ofrecen la base cuantitativa sobre la que descansa este diagnóstico, pero su interpretación requiere ir más allá de los valores individuales para capturar las interacciones sistémicas que los conectan.

La conclusión más importante que emerge del análisis de la línea de base no es ningún indicador individual, sino una relación estructural: la asimetría entre el componente de Respuesta institucional, que ha avanzado principalmente en servicios básicos y renovabilidad eléctrica, y el componente de Estado biofísico, que, en las dimensiones forestal, hídrica y de biodiversidad continúa deteriorándose. Esta asimetría implica que el sistema está construyendo bienestar humano de corto plazo sobre una base ecosistémica que se deteriora, lo que genera una vulnerabilidad de largo plazo que los indicadores convencionales de desarrollo no capturan, pero que el marco FMPEIR hará visible en esta investigación.

Las tres conclusiones que estructuran el programa de trabajo de los capítulos siguientes son: la primera, que El Salvador se encuentra en estrés ambiental estructural en los componentes biofísicos que sustentan la resiliencia de largo plazo, agua, suelos, bosques, biodiversidad, con

brechas que en varios indicadores se aproximan a umbrales de irreversibilidad; la segunda, que existe un avance genuino y cuantitativamente sólido en la dimensión energética y de servicios básicos, que posiciona al país favorablemente en el contexto regional pero que no ha alcanzado aún los sectores más críticos para la descarbonización del sistema; y la tercera, que la brecha entre los marcos normativos e institucionales existentes y su implementación efectiva, condicionada por la insuficiencia del financiamiento ambiental público y la fragmentación de las competencias institucionales, representa el obstáculo central para convertir los compromisos formales de sostenibilidad en mejoras medibles y duraderas del estado ambiental.

Capítulo 2. Planteamiento del problema

La crisis ambiental contemporánea se ha consolidado como uno de los desafíos estructurales más urgentes del siglo XXI. Investigaciones de alcance global han evidenciado que la humanidad ha sobrepasado varios de los límites planetarios que garantizan la estabilidad del sistema terrestre, en particular en lo relativo al cambio climático, la pérdida de biodiversidad y la alteración de los ciclos biogeoquímicos (Rockström et al., 2009; Steffen et al., 2015). Estos procesos no se manifiestan de manera homogénea en el espacio: sus impactos tienden a concentrarse e intensificarse precisamente en los países con mayor vulnerabilidad ecológica, menor capacidad institucional y mayores presiones demográficas sobre el territorio.

El Salvador representa, en este contexto, un caso paradigmático de fragilidad socioambiental acumulada. Con una extensión de apenas 21,041 km² y una población de aproximadamente 6.5 millones de habitantes, el país presenta la mayor densidad poblacional del continente americano y una de las tasas históricas de transformación del territorio más elevadas de América Latina. La convergencia de presiones demográficas, dinámicas de uso del suelo históricamente extractivistas, exposición permanente a fenómenos hidrometeorológicos extremos y capacidades institucionales limitadas configura un escenario de complejidad socioambiental que demanda análisis sistemáticos, integradores y con perspectiva de largo plazo.

2.1 La fragmentación del conocimiento ambiental y la necesidad de integración

La gobernanza ambiental efectiva depende, de manera fundamental, de la disponibilidad de información confiable, actualizada y sistemáticamente articulada. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE, 2019) ha subrayado que los sistemas de información ambiental son condición necesaria, aunque no suficiente,

para la formulación, el seguimiento y la evaluación de políticas públicas con base en evidencia. En ausencia de datos integrados y comparables en el tiempo y el espacio, la toma de decisiones ambientales se vuelve inevitablemente reactiva, sectorial y de corto plazo.

En El Salvador existe producción institucional y académica relevante en materia ambiental: estudios sobre calidad del agua, evaluaciones de cobertura forestal, informes sobre gestión de residuos sólidos, análisis de riesgo climático. Sin embargo, esta información se presenta de manera sectorial y dispersa, sin articulación sistemática entre sus componentes. La interdependencia intrínseca de los problemas ambientales salvadoreños hace que esta fragmentación sea analíticamente costosa: la deforestación incide directamente sobre la erosión de suelos y la capacidad de infiltración hídrica; la contaminación de cuerpos de agua superficiales afecta la salud pública y la productividad agrícola; la urbanización sin planificación territorial adecuada incrementa la exposición a inundaciones y deslizamientos; y el cambio climático amplifica la frecuencia e intensidad de estos procesos, exacerbando las desigualdades sociales preexistentes.

Estas interrelaciones reflejan lo que Ostrom (2010) denomina sistemas socioecológicos complejos: sistemas en los que los componentes naturales y sociales están acoplados de manera funcional, de modo que las perturbaciones en cualquiera de ellos se propagan hacia los demás a través de retroalimentaciones que no pueden ser capturadas por enfoques analíticos sectoriales. Su gestión requiere información articulada sobre múltiples componentes y escalas, así como marcos de gobernanza capaces de procesar esa complejidad y traducirla en decisiones coherentes. La ausencia de una obra académica que integre sistémicamente los principales componentes del estado ambiental salvadoreño constituye, en este sentido, una brecha significativa tanto en el campo del conocimiento científico nacional como en la infraestructura analítica para la política pública.

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, 2019) ha insistido en que la comprensión de los procesos de degradación ambiental exige marcos integrados que superen las visiones sectoriales o fragmentadas, articulando en un mismo análisis los factores socioe-

conómicos y demográficos que generan presiones, las condiciones biofísicas que resultan de dichas presiones, los impactos sobre el bienestar humano y los ecosistemas, y las respuestas institucionales y sociales que buscan corregir o mitigar esos impactos. Esta es precisamente la lógica del marco analítico FMPEIR que estructura la presente investigación.

2.2 Los compromisos internacionales y la necesidad de evidencia nacional

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible establece un marco normativo global que integra dimensiones ambientales, sociales y económicas bajo una visión de interdependencia sistémica (Naciones Unidas, 2015). Los ODS directamente vinculados a la dimensión ambiental, ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), ODS 7 (Energía asequible y no contaminante), ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), ODS 12 (Producción y consumo responsables), ODS 13 (Acción por el clima), ODS 14 (Vida submarina) y ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres), requieren monitoreo continuo mediante indicadores técnicos y análisis rigurosos que permitan evaluar avances, identificar brechas y ajustar estrategias de implementación.

De manera complementaria, el Acuerdo de París bajo la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC, 2015) compromete a El Salvador a implementar y actualizar periódicamente su Contribución Determinada a Nivel Nacional, que incluye tanto metas de mitigación de emisiones de GEI como compromisos de adaptación a los impactos del cambio climático. El seguimiento riguroso de estas metas exige evaluaciones técnicas que integren datos climáticos, energéticos, territoriales y sectoriales en un análisis coherente.

Una investigación que sistematice el estado ambiental salvadoreño bajo el enfoque FMPEIR constituye, en este contexto, un instrumento estratégico de múltiple utilidad: permite evaluar el grado de avance hacia los ODS ambientales; fundamenta los procesos de actualización de las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional; apoya la elaboración de los informes nacionales ante los convenios multilaterales de los que El Salvador es parte; y proporciona la base analítica para la identificación de prioridades de inversión pública y cooperación internacional en materia ambiental.

2.3 La vulnerabilidad climática y los riesgos acumulativos

El Salvador se encuentra entre los países con mayor exposición a eventos climáticos extremos en América Latina y el Caribe. El IPCC (2023) ha confirmado que los efectos del cambio climático se están acelerando a nivel global, con incrementos en la frecuencia e intensidad de eventos hidrometeorológicos extremos, alteraciones en los regímenes de precipitación y temperatura, y amenazas crecientes para la seguridad hídrica y alimentaria. En el caso salvadoreño, las sequías prolongadas del Corredor Seco, las lluvias extremas asociadas a tormentas tropicales y depresiones tropicales, y los eventos de remoción en masa generan pérdidas económicas recurrentes y afectaciones sociales de gran magnitud, especialmente en las comunidades rurales más vulnerables.

El BM (2022) ha advertido que, en ausencia de políticas de adaptación adecuadas, el cambio climático puede revertir décadas de avances en la reducción de la pobreza y profundizar las desigualdades sociales existentes, particularmente en países de ingreso medio-bajo con alta exposición a riesgos climáticos como El Salvador. Esta dimensión de justicia climática refuerza la urgencia de contar con análisis territoriales diferenciados que identifiquen los sectores de población y los territorios que enfrentan mayor vulnerabilidad, como punto de partida indispensable para el diseño de políticas de adaptación equitativas y eficaces.

La integración de información climática con datos socioeconómicos y de estado ambiental, que el enfoque FMPEIR facilita de manera estructurada, es una condición analítica necesaria para identificar territorios prioritarios de intervención, anticipar trayectorias de riesgo bajo distintos escenarios de gobernanza y gestión, y fundamentar la asignación de recursos de cooperación internacional hacia las áreas de mayor necesidad. Sin esta base integrada de información, las estrategias de adaptación climática en El Salvador corren el riesgo de ser reactivas, descoordinadas y desvinculadas de las condiciones estructurales de vulnerabilidad que las determinan.

2.4 La degradación de ecosistemas y la presión sobre los recursos naturales

La degradación de los ecosistemas constituye una dimensión crítica de la problemática ambiental salvadoreña, con ramificaciones que atraviesan la seguridad hídrica, la seguridad alimentaria, la salud pública y la exposición al riesgo de desastres. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2020) documenta que la pérdida de cobertura forestal continúa siendo un desafío persistente en América Latina, con implicaciones directas sobre la biodiversidad, la capacidad de captura de carbono y la regulación hidrológica. En El Salvador, cuya cobertura boscosa original ha sido reducida históricamente en más del 85 % del territorio, este proceso tiene consecuencias especialmente severas.

La biodiversidad desempeña funciones ecológicas fundamentales para la estabilidad de los sistemas naturales y la provisión de los servicios ecosistémicos de los que depende el bienestar humano: regulación del ciclo del agua, control de la erosión, polinización de cultivos, regulación del microclima, provisión de materias primas y recursos genéticos. La alteración de estos sistemas genera cascadas de impactos acumulativos que comprometen la sostenibilidad de las actividades productivas, especialmente la agricultura, la pesca artesanal y el turismo, y reducen la resiliencia territorial frente a perturbaciones climáticas y geofísicas.

Desde la perspectiva del marco de los Sistemas Socioecológicos (Ostrom, 2009), la degradación de los ecosistemas salvadoreños no puede analizarse de manera independiente de las condiciones institucionales, económicas y sociales que la generan y perpetúan. Los patrones de acceso y control sobre los recursos naturales, las estructuras de incentivos que determinan las decisiones de uso del suelo, la calidad de los mecanismos de gobernanza ambiental y las capacidades adaptativas de las comunidades rurales son variables interdependientes que deben ser analizadas conjuntamente con los indicadores biofísicos de estado de los ecosistemas.

2.5 El rol de la educación superior y la producción de conocimiento aplicado

Las instituciones de educación superior desempeñan un papel estratégico en la generación de conocimiento aplicado y en la formación de profesionales y ciudadanos capaces de comprender y abordar los desafíos ambientales contemporáneos. La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, 2017) ha enfatizado que la educación para el desarrollo sostenible requiere la producción de conocimiento contextualizado, enraizado en las realidades nacionales y locales, y orientado hacia la transformación de prácticas y estructuras que perpetúan la insostenibilidad.

La disponibilidad de una obra académica que sistematice el estado del medioambiente en El Salvador con rigor científico y perspectiva integradora contribuirá a fortalecer múltiples funciones de la educación superior: la docencia en ciencias ambientales, ciencias sociales, ingeniería, economía y derecho ambiental; la investigación formativa y avanzada sobre problemáticas socioambientales nacionales; la vinculación con actores institucionales para la transferencia de conocimiento a la política pública; y la formación de ciudadanía informada y crítica sobre los retos de sostenibilidad que enfrenta el país. En un contexto de creciente urgencia ambiental, la producción de conocimiento riguroso y aplicado es, al mismo tiempo, una responsabilidad académica y una contribución ética al bien público.

2.6 Síntesis y propósito

La justificación de la presente investigación descansa sobre siete dimensiones complementarias que, en conjunto, fundamentan su pertinencia científica, social y política. En primer lugar, la necesidad de superar la fragmentación del conocimiento ambiental disponible sobre El Salvador, produciendo una síntesis sistemática que articule los principales componentes del estado ambiental nacional. En segundo lugar, la urgencia de consolidar una base científica actualizada que sirva como referencia para la investigación, la docencia y la política pública. En ter-

cer lugar, el imperativo de apoyar la formulación de políticas públicas basadas en evidencia en un campo, la gestión ambiental, donde la información fragmentada genera decisiones subóptimas. En cuarto lugar, la necesidad de evaluar el avance de los compromisos internacionales asumidos por El Salvador en materia de sostenibilidad, desde la Agenda 2030 hasta el Acuerdo de París. En quinto lugar, el propósito de fortalecer la investigación y la docencia en la educación superior nacional mediante la producción de conocimiento contextualizado. En sexto lugar, la aspiración de contribuir a la formación de una ciudadanía informada y capaz de participar activamente en los debates y decisiones sobre el futuro ambiental del país. Y en séptimo lugar, la ambición de construir escenarios prospectivos que permitan anticipar trayectorias posibles bajo distintos modelos de gobernanza y gestión ambiental, orientando la acción colectiva hacia horizontes de mayor sostenibilidad y equidad.

La presente investigación aspira a convertirse en una referencia académica y técnica nacional que articule evidencia científica actualizada, análisis crítico de los factores estructurales de la degradación ambiental y perspectiva estratégica sobre las condiciones y los caminos posibles hacia la sostenibilidad en El Salvador. El enfoque FMPEIR, articulado con los marcos teóricos del desarrollo sostenible, la ecología política y las ciencias de la sostenibilidad que se desarrollan en el capítulo siguiente, provee la estructura analítica que hace posible esta integración.

Capítulo 3. Marco teórico

3.1 Introducción al marco teórico

El análisis del estado del medioambiente en El Salvador requiere un andamiaje conceptual sólido que permita interpretar la complejidad de las interacciones entre los sistemas naturales y sociales en un territorio caracterizado por una alta densidad poblacional, una marcada vulnerabilidad ecosistémica y desafíos estructurales de desarrollo sostenible. El presente marco teórico articula un conjunto de corrientes epistemológicas, paradigmas disciplinares y enfoques metodológicos que fundamentan la investigación y orientan la selección, organización e interpretación de los datos ambientales recolectados.

El marco se construye sobre tres pilares fundamentales: (1) la teoría del desarrollo sostenible y sus derivaciones contemporáneas; (2) la ecología política como enfoque analítico de las relaciones de poder en torno a los recursos naturales; y (3) el modelo analítico FMPEIR como estructura operativa para la organización e interpretación de la información ambiental. Estos pilares se articulan de manera sistémica, ofreciendo una perspectiva integral que supera los enfoques descriptivos convencionales.

Desde el punto de vista epistemológico, el marco adoptado reconoce la existencia de mecanismos causales reales en los sistemas socioecológicos, al tiempo que asume que el conocimiento científico sobre dichos mecanismos es siempre parcial, situado e históricamente contingente. Esta postura es coherente con la naturaleza transdisciplinaria de las ciencias de la sostenibilidad, que integran métodos cuantitativos y cualitativos, saberes científicos y locales, y perspectivas sincrónicas y diacrónicas para abordar problemas ambientales de elevada complejidad. El marco también incorpora una dimensión normativa explícita: la

investigación sobre sostenibilidad no es axiológicamente neutral, y los supuestos valorativos que orientan la selección de indicadores, la definición de umbrales de sostenibilidad y la evaluación de las respuestas institucionales se hacen explícitos en cada sección.

3.2 El paradigma del desarrollo sostenible

3.2.1 Fundamentos conceptuales y evolución histórica

El concepto de desarrollo sostenible surge formalmente en el Informe Brundtland (CMMAD, 1987), que lo define como el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades. Esta definición inaugural contiene dos dimensiones normativas fundamentales: el concepto de necesidades, especialmente las esenciales de los más pobres, y la idea de limitaciones impuestas por el estado de la tecnología y la organización social sobre la capacidad del medioambiente para satisfacer necesidades presentes y futuras.

La evolución posterior del paradigma ha generado múltiples elaboraciones teóricas, entre las que destacan la sostenibilidad débil, que postula la sustituibilidad entre capital natural y capital manufacturado (Solow, 1993; Hartwick, 1977), y la sostenibilidad fuerte, que rechaza dicha sustituibilidad para los componentes del capital natural crítico, argumentando la existencia de umbrales de irreversibilidad ecológica (Daly, 1990; Pearce y Turner, 1990). Para El Salvador, país que ha superado múltiples umbrales de degradación ecosistémica, la perspectiva de la sostenibilidad fuerte resulta teóricamente más apropiada.

El concepto de capital natural crítico (Ekins et al., 2003) identifica aquellos componentes del sistema natural cuya pérdida genera impactos irreversibles sobre el bienestar humano y la integridad ecosistémica, y que por tanto no pueden ser compensados mediante incrementos en otras formas de capital. En el contexto salvadoreño, los acuíferos de la planicie costera, los remanentes de bosque nebuloso en las zonas montañosas del

norte, los manglares y humedales costeros y la diversidad genética de las variedades criollas de maíz y frijol constituyen ejemplos paradigmáticos de capital natural crítico que demandan protección prioritaria.

Desde una perspectiva histórica, el pensamiento sobre desarrollo sostenible ha incorporado dimensiones que la definición brundtlandiana no contemplaba explícitamente: la justicia intergeneracional e intrageneracional, los derechos de la naturaleza, la economía ecológica, los enfoques del buen vivir y la pluriversalidad epistémica. La economía ecológica (Daly, 1996; Costanza et al., 1997; Martínez-Alier, 2002) ofrece, en particular, herramientas para cuantificar el valor de los servicios ecosistémicos y fundamentar económicamente las decisiones de conservación, complementando los argumentos éticos y científicos que sustentan la protección del capital natural.

3.2.2 Los ODS como marco normativo

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible establece 17 ODS y 169 metas que constituyen el marco normativo internacional de referencia para la acción ambiental. Para El Salvador, los ODS de mayor relevancia ambiental directa incluyen el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante), el ODS 13 (Acción por el clima), el ODS 14 (Vida submarina), el ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres) y el ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles). Los indicadores asociados a estos objetivos proporcionan métricas estandarizadas que facilitan la comparabilidad internacional y el seguimiento temporal de las condiciones ambientales, constituyendo una capa analítica fundamental en la estructura de datos de esta investigación.

No obstante, el marco de los ODS presenta limitaciones analíticas que deben ser reconocidas. La naturaleza multidimensional y potencialmente contradictoria de los 17 objetivos requiere herramientas complementarias para identificar sinergias y compensaciones entre metas. La ambición normativa de la Agenda 2030 contrasta frecuentemente con las capacidades institucionales y los recursos disponibles en países como El Salvador, lo que genera brechas de implementación que el presente marco busca identificar y analizar críticamente.

3.2.3 El concepto de límites planetarios

El marco de los límites planetarios (Rockström et al., 2009; Steffen et al., 2015) postula la existencia de nueve procesos biofísicos del sistema terrestre, incluyendo el cambio climático, la integridad de la biosfera, los flujos biogeoquímicos, el uso del agua dulce y el cambio en el uso del suelo, para los cuales es posible identificar umbrales cuantitativos cuya transgresión incrementa el riesgo de cambios abruptos e irreversibles. Aplicado al contexto salvadoreño, este marco permite evaluar el estado de los subsistemas ambientales nacionales en relación con tendencias globales, identificando retroalimentaciones entre la degradación local y los procesos planetarios. La conexión con el modelo FMPEIR es directa: los procesos biofísicos identificados en este marco operan como condicionantes del componente de Estado, estableciendo umbrales de referencia científicamente fundamentados.

3.3 Ecología política como marco analítico

3.3.1 Fundamentos de la ecología política

La ecología política (Blaikie y Brookfield, 1987; Peet y Watts, 2004; Robbins, 2012) emerge como respuesta crítica a los enfoques ecológicos convencionales que tienden a naturalizar los problemas ambientales, invisibilizando sus dimensiones políticas, económicas e históricas. Esta perspectiva analiza cómo las relaciones de poder — articuladas en torno a clase, género, etnicidad y escala territorial— determinan el acceso, control y distribución de los recursos naturales, así como quiénes asumen los costos de la degradación ambiental y quiénes capturan sus beneficios.

En el contexto salvadoreño, la ecología política resulta especialmente pertinente para analizar la concentración histórica de la tenencia de la tierra, los conflictos en torno al agua, la distribución espacialmente inequitativa de los riesgos ambientales y la débil capacidad institucional para regular el aprovechamiento de los recursos frente a intereses priva-

dos. La historia ambiental del país, marcada por la expansión colonial, el ciclo agroexportador del café y el algodón, la industrialización incipiente y la urbanización acelerada, no puede desvincularse de su historia política y económica. Peet y Watts (2004) identifican tres corrientes dentro de la ecología política contemporánea que esta investigación integra: la cultural, la crítica y la verde.

3.3.2 Metabolismo social y flujos de materiales y energía

El concepto de metabolismo social (Fischer-Kowalski, 1998; Toledo, 2013) permite cuantificar los intercambios de materia y energía entre la sociedad y la naturaleza. El Salvador presenta un perfil metabólico propio de las economías periféricas: alta extracción de recursos naturales, baja capacidad de procesamiento industrial interno, exportación de bienes con alta intensidad de recursos e importación de bienes con mayor contenido tecnológico. Este patrón genera un déficit ecológico estructural que el análisis de los flujos de materiales y energía, a través de indicadores como la extracción doméstica total, la intensidad de materiales y la huella hídrica, cuantifica y vincula con el componente de Presión del modelo FMPEIR.

3.3.3 Justicia ambiental, distribución de riesgos e historia ambiental

La justicia ambiental (Bullard, 1990; Schlosberg, 2007) examina la distribución socialmente desigual de los beneficios y cargas ambientales. Schlosberg propone una concepción tridimensional que integra justicia distributiva, de reconocimiento y participativa, especialmente relevante en un país con historia de exclusión sistemática de las comunidades rurales, indígenas y afrodescendientes de los procesos de gobernanza ambiental. La dimensión intergeneracional de la justicia ambiental es igualmente central: la irreversibilidad documentada de muchos procesos de degradación, extinción de especies, agotamiento de acuíferos, contaminación persistente por plaguicidas organoclorados, hace que la equidad entre generaciones sea una consideración operativa, no solo abstracta.

La comprensión del estado ambiental actual exige también una perspectiva histórica que identifique los procesos de largo plazo que lo configuraron. La historia ambiental salvadoreña puede periodizarse en cuatro etapas: el período prehispánico, con sistemas de uso del suelo policulturales de alta cobertura boscosa; el período colonial (1524–1821), con la introducción del ganado y el añil y la primera deforestación sistemática; el período agroexportador (1821–1979), con la expansión del café, el algodón y la caña; y el período contemporáneo (1979–presente), marcado por la urbanización acelerada, la industrialización incipiente y la intensificación agrícola. Cada etapa ha dejado una huella acumulada que condiciona la capacidad actual de los ecosistemas para proveer servicios ambientales.

3.4 Ciencias de la sostenibilidad y sistemas socioecológicos

3.4.1 Las ciencias de la sostenibilidad

Las ciencias de la sostenibilidad (Kates et al., 2001; Clark y Dickson, 2003) constituyen un campo transdisciplinario orientado a comprender las interacciones entre la naturaleza y la sociedad, y a producir conocimiento que sea simultáneamente científicamente riguroso y socialmente útil. Su rasgo distintivo es la coproducción de conocimiento entre investigadores y actores sociales para la resolución de problemas del mundo real. Las preguntas fundacionales de Kates et al., sobre vulnerabilidad, resiliencia, monitoreo y gobernanza, estructuran el diseño metodológico de esta investigación y orientan la selección de indicadores en cada componente del FMPEIR.

3.4.2 Marco de los SSE y resiliencia

El marco de los SSE (Ostrom, 2009; Walker et al., 2004; Berkes y Folke, 1998) concibe el sistema ambiental como una red de componentes interdependientes, sistemas de recursos, sistemas de gobernanza y acto-

res, con propiedades emergentes de resiliencia y adaptabilidad. La distinción entre resiliencia de ingeniería, resiliencia ecológica y transformabilidad (Walker et al., 2004) es analíticamente fundamental: en múltiples subsistemas ambientales salvadoreños se han superado los umbrales de la resiliencia ecológica, haciendo necesaria la transformación sistémica. La teoría de la panarquía (Gunderson y Holling, 2002) complementa este marco al introducir una perspectiva multiescalar que reconoce las interconexiones entre las dinámicas locales, de cuenca, municipio, y los procesos nacionales y globales que las condicionan.

El enfoque de gestión adaptativa (Holling, 1973; Carpenter et al., 2001) provee un protocolo metodológico específico: formular hipótesis explícitas sobre las relaciones causales en el sistema socioecológico, diseñar intervenciones como experimentos, monitorear resultados y actualizar modelos y estrategias sobre la base de la evidencia acumulada. Este ciclo de aprendizaje adaptativo es especialmente valioso en el contexto salvadoreño, donde la incertidumbre sobre relaciones causales y umbrales sistémicos es elevada y los errores de gestión pueden ser irreversibles.

3.5 El modelo FMPEIR: Fundamentos, componentes y aplicación a El Salvador

3.5.1 Genealogía del modelo: de PER a FMPEIR

El modelo FMPEIR—equivalente al marco DPSIR en inglés (Driving forces–Pressure–State–Impact–Response)— es resultado de la evolución progresiva de los marcos analíticos ambientales. El modelo Presión–Estado–Respuesta (PER) de la OCDE estableció la lógica causal básica en los años noventa: las actividades humanas ejercen presiones sobre el ambiente, modificando su estado, lo que genera respuestas sociales e institucionales. La Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA, 1999) amplió este esquema incorporando las Fuerzas Motrices, los factores socioeconómicos subyacentes que generan las presiones, y los Impactos, los efectos del cambio de estado sobre los ecosistemas, la salud humana y las actividades económicas. Su popularidad como herramienta de sín-

tesis ambiental se debe a su capacidad de integrar información de múltiples disciplinas en una narrativa causal coherente, su facilidad de comunicación con audiencias diversas y su compatibilidad con los sistemas de indicadores de las principales agencias de monitoreo internacional.

3.5.2 Componentes del modelo FMPEIR aplicados a El Salvador

Fuerzas Motrices (F)

Las fuerzas motrices son los procesos socioeconómicos, demográficos e institucionales que impulsan cambios en las actividades humanas y, en última instancia, en el estado del ambiente. En El Salvador, las fuerzas motrices identificadas incluyen el crecimiento demográfico y la urbanización acelerada, con tasas que han pasado del 39 % en 1980 al 74 % en 2023; la estructura económica sectorial con énfasis en la agroindustria, el comercio y las remesas que representan alrededor del 24 % del PIB; los modelos de tenencia y uso de la tierra; las dinámicas de pobreza y desigualdad social; la apertura comercial; y el cambio climático como fuerza motriz de segundo orden. Las remesas merecen análisis particular: al condicionar los patrones de consumo, modificar los incentivos para la actividad productiva rural e influir en la urbanización, generan cadenas causales que conectan las decisiones de los hogares con la presión sobre los ecosistemas.

Presiones (P)

Las presiones son las perturbaciones directas que las actividades humanas ejercen sobre los sistemas ambientales. En El Salvador, las más significativas comprenden las emisiones de GEI y contaminantes atmosféricos; las descargas de aguas residuales domésticas e industriales; la extracción de recursos hídricos; la deforestación y el cambio de uso del suelo; la generación y disposición inadecuada de residuos sólidos; y el uso intensivo de agroquímicos. Su cuantificación requiere indicadores

específicos: carga orgánica vertida a cuerpos de agua (en toneladas de DBO por año), tasa anual de cambio de cobertura forestal, volumen de agua extraída en relación con la disponibilidad renovable, plaguicidas aplicados por hectárea agrícola, y emisiones de GEI por sector en toneladas equivalentes de CO₂.

Estado (E)

El estado describe la condición actual de los componentes ambientales, agua, aire, suelo, biodiversidad y ecosistemas, como resultado acumulado de las presiones históricas y de la capacidad de resiliencia de los sistemas. Los indicadores clave incluyen índices de calidad del agua (pH, conductividad, oxígeno disuelto, nitratos, fosfatos, coliformes fecales), índices de escasez hídrica por cuenca, niveles piezométricos de acuíferos, tasas de erosión hídrica estimadas mediante modelos como la RUSLE, concentración de plaguicidas persistentes en suelos y métricas de biodiversidad como riqueza de especies y conectividad de hábitats.

Impacto (I)

Los impactos representan las consecuencias del cambio de estado sobre el bienestar humano, la integridad ecosistémica y la viabilidad económica. En El Salvador incluyen el incremento de enfermedades de transmisión hídrica y vectorial; las pérdidas en el sector agropecuario por erosión, sequía y eventos extremos; la reducción de la disponibilidad y seguridad hídrica; la pérdida de servicios ecosistémicos de regulación hídrica, polinización y control de plagas; y los efectos sobre la seguridad alimentaria de las comunidades rurales. Su cuantificación recurre a análisis de carga de enfermedad (Años de Vida Ajustados por Discapacidad), modelos econométricos de daños agropecuarios y valoración contingente de la pérdida de bienestar por degradación ecosistémica.

Respuesta (R)

Las respuestas agrupan las acciones adoptadas por la sociedad, desde el nivel comunitario hasta el internacional, para prevenir, mitigar o corregir los impactos negativos o adaptarse a las condiciones alteradas. Incluyen políticas públicas, marcos regulatorios, programas de inversión ambiental, iniciativas de restauración ecosistémica, acuerdos multilaterales y mecanismos de gobernanza participativa. La evaluación de su efectividad debe distinguir entre la existencia formal de instrumentos y su implementación efectiva con impactos medibles. En El Salvador existe una brecha documentada entre la producción normativa, relativamente prolífica, y la transformación real de las condiciones ambientales, lo que constituye en sí mismo un objeto de análisis central en esta investigación. Adicionalmente, la evaluación debe considerar la pertinencia de las respuestas: las que actúan sobre las fuerzas motrices son las más transformadoras; las que actúan sobre las presiones son más eficaces pero costosas; las que actúan únicamente sobre los impactos son necesarias pero insuficientes.

3.5.3 Retroalimentaciones sistémicas y limitaciones del modelo

El modelo FMPEIR opera con mayor rigor cuando reconoce sus múltiples lazos de retroalimentación: las respuestas pueden modificar las fuerzas motrices; los impactos pueden alterar las dinámicas de presión; el estado de los ecosistemas retroalimenta las condiciones sociales a través de los servicios ecosistémicos. Entre las limitaciones del modelo se encuentran la dificultad para incorporar dinámicas de no linealidad y umbrales de cambio abrupto, la tendencia a subvalorar los saberes locales, y la invisibilización de los actores específicos que se benefician del statu quo. Estas limitaciones se mitigan mediante la integración del marco de los SSE y los principios de la ecología política como perspectivas complementarias.

3.6 Marco normativo e institucional de la gestión ambiental en El Salvador

3.6.1 Arquitectura institucional ambiental

La gestión ambiental en El Salvador se articula en torno al Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) como instancia rectora, con la Ley del Medio Ambiente (Decreto Legislativo No. 233, 1998) y su Reglamento General como instrumentos normativos centrales. La arquitectura institucional presenta características de fragmentación sectorial, con competencias distribuidas entre el MARN, el MAG, el Ministerio de Obras Públicas (MOP), el MINSAL, la CEL, la ANDA y los municipios, sin mecanismos de coordinación suficientemente robustos para garantizar la coherencia de las decisiones desde una perspectiva sistémica. El sistema de evaluación de impacto ambiental (EIA) muestra debilidades persistentes en capacidades técnicas, mecanismos de participación pública y sistemas de seguimiento posaprobación, cuya reforma constituye una de las prioridades identificadas en el componente de Respuesta del FMPEIR.

3.6.2 Compromisos internacionales y gobernanza adaptativa

El Salvador es parte de los principales convenios ambientales multilaterales: la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y el Acuerdo de París, el Convenio sobre la Diversidad Biológica y el Marco Kunming-Montreal, el Convenio de Estocolmo, el Convenio de Basilea y la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación. La gobernanza adaptativa (Folke et al., 2005; Dietz et al., 2003) propone estructuras de toma de decisiones flexibles, policéntricas y con capacidad de aprendizaje que resultan especialmente pertinentes para El Salvador: fortalecer los sistemas de monitoreo ambiental, desarrollar mecanismos de alerta temprana integrados y promover la participación efectiva de las comunidades locales en la gestión de los recursos naturales son requisitos institucionales indispensables para avanzar hacia la sostenibilidad.

3.7 Vulnerabilidad, riesgo y cambio climático en El Salvador

3.7.1 Conceptualización de la vulnerabilidad socioambiental

La vulnerabilidad socioambiental, el grado en el que un sistema es susceptible de sufrir daños ante perturbaciones, en función de su exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa (IPCC, 2014; Adger, 2006), no es únicamente una característica física del territorio, sino una propiedad emergente de la interacción entre los sistemas natural y social. El Salvador está sistemáticamente clasificado entre los países con mayor vulnerabilidad climática global, por la convergencia de una alta exposición geofísica a amenazas sísmicas, volcánicas, hidrometeorológicas y de remoción en masa; una elevada sensibilidad derivada de la degradación ecosistémica acumulada; y capacidades adaptativas limitadas asociadas a pobreza, inequidad y debilidad institucional. Gallopín (2006) señala que las estrategias de reducción de vulnerabilidad pueden operar sobre cualquiera de estas dimensiones: reduciendo la exposición, disminuyendo la sensibilidad mediante restauración ecosistémica o fortaleciendo la capacidad adaptativa mediante educación y diversificación de medios de vida.

3.7.2 Cambio climático, desastres socionaturales y gestión del riesgo

En el modelo FMPEIR, el cambio climático opera como fuerza motriz de segundo orden que intensifica presiones preexistentes y como amplificador de impactos. Las proyecciones del IPCC (2022) para América Central anticipan mayor probabilidad de sequías prolongadas en el Corredor Seco, que ya afecta a departamentos como Cabañas, Cuscatlán y San Vicente; incremento en la intensidad de eventos hidrometeorológicos y mayor variabilidad interanual de las precipitaciones que dificulta la planificación agrícola. El concepto de desastre socionatural subraya que estos eventos no son simplemente manifestaciones de la naturaleza, sino fenómenos en los que la amenaza natural interactúa con condicio-

nes de vulnerabilidad construidas socialmente. El Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015–2030 establece metas e indicadores complementarios a los de la Agenda 2030 y el Acuerdo de París.

3.8 Servicios ecosistémicos, capital natural y perspectivas de sostenibilidad

3.8.1 Marco de los servicios ecosistémicos

El marco de los servicios ecosistémicos (MEA, 2005; TEEB, 2010; IPBES, 2019) articula los vínculos entre el estado de los ecosistemas, componente E del FMPEIR, y los impactos sobre el bienestar humano, componente I. Las cuatro categorías de servicios aprovisionamiento, regulación, culturales y de soporte, permiten visibilizar la dependencia funcional de la sociedad salvadoreña de sus ecosistemas. Los ecosistemas estratégicos para El Salvador incluyen la cuenca alta del río Lempa, los humedales costeros marinos, los bosques de galería y los remanentes de bosque nebuloso. La pérdida de estos ecosistemas genera costos ocultos, reducción de generación hidroeléctrica por sedimentación de embalses, incremento de costos de potabilización, pérdidas en la pesca artesanal, mayor incidencia de inundaciones, cuya cuantificación fundamenta económicamente la inversión en conservación y restauración.

3.8.2 Perspectivas de sostenibilidad: transiciones, economía circular y soluciones basadas en la naturaleza

Las perspectivas de sostenibilidad para El Salvador se articulan en torno a cuatro líneas de transformación complementarias. La primera es la transición sociotécnica (Geels, 2002; Loorbach et al., 2017): el modelo multinivel identifica en El Salvador nichos de innovación emergentes, energías renovables, agroecología, gestión comunitaria del agua, que desafían los regímenes dominantes de energía fósil y agricultura convencional. La segunda es la economía circular (Ellen MacArthur Foundation, 2013): los residuos orgánicos de la agroindustria, los lodos de

plantas de tratamiento y los residuos textiles representan flujos con potencial de aprovechamiento que actualmente constituyen presiones ambientales innecesarias. La tercera es la restauración ecosistémica y las soluciones basadas en la naturaleza, en el marco de la Década de la ONU para la Restauración de Ecosistemas (2021–2030) y la meta 30x30 del Marco Kunming-Montreal: la reforestación de cuencas abastecedoras, la restauración de manglares y la implementación de drenaje urbano sostenible son estrategias con múltiples cobeneficios para la adaptación climática y la reducción del riesgo. La cuarta es la agroecología: los sistemas milpa, los cafetales bajo sombra y los huertos familiares diversificados representan un patrimonio adaptativo de valor estratégico para la sostenibilidad agraria del país.

3.9 Articulación del marco teórico con el modelo FMPEIR y orientaciones metodológicas

Los paradigmas del desarrollo sostenible, la ecología política y las ciencias de la sostenibilidad proveen el sustrato epistemológico desde el cual se interpreta la realidad ambiental salvadoreña, orientando la selección de variables, la formulación de hipótesis y la interpretación de resultados. El marco de los SSE y los servicios ecosistémicos articula los componentes biofísicos e institucionales. El marco normativo delimita el espacio de las respuestas posibles. Sobre esta base conceptual, el modelo FMPEIR opera como estructura analítica operativa que organiza, categoriza e interpreta los datos empíricos recolectados, permitiendo: identificar las fuerzas que impulsan la degradación; cuantificar las presiones directas; evaluar el estado ambiental; valorar los impactos; y analizar la efectividad de las respuestas.

La complejidad de los sistemas socioecológicos exige un enfoque metodológico mixto: los métodos cuantitativos, análisis de series temporales, modelación estadística, sistemas de información geográfica, valoración económica, permiten establecer magnitudes, tendencias y relaciones causales. Los métodos cualitativos, análisis documental, entrevistas a informantes clave, grupos focales comunitarios, análisis de

discurso, capturan las dimensiones de significado, poder y agencia que los primeros tienden a invisibilizar. La escala territorial privilegiada es la nacional, con desagregación por cuencas hidrográficas para los componentes hídricos, dado que estas unidades biofísicas permiten articular el análisis de las presiones en las partes altas con los impactos en las partes medias, bajas y costeras.

Del marco teórico se derivan cuatro orientaciones específicas para el análisis empírico: primero, incorporar las dimensiones de poder y desigualdad en el análisis de las Fuerzas Motrices, evitando reducirlas a variables anónimas; segundo, integrar indicadores de resiliencia y umbrales sistémicos en la caracterización del Estado ambiental; tercero, incorporar la distribución social y espacial en el análisis de los Impactos; y cuarto, evaluar críticamente la brecha de implementación en la dimensión de Respuesta, identificando no solo las respuestas existentes, sino las necesarias para revertir las tendencias de deterioro documentadas. El conjunto del análisis está orientado tanto al diagnóstico retrospectivo como a la prospectiva normativa: identificar las trayectorias de cambio que conduzcan hacia un estado ambiental sostenible, equitativo y resiliente en El Salvador.

Capítulo 4. Diseño metodológico

El diseño metodológico de esta investigación responde directamente a las orientaciones epistemológicas y analíticas establecidas en el Capítulo II. La naturaleza transdisciplinaria del objeto de estudio, el estado del medioambiente en El Salvador y sus perspectivas de sostenibilidad, y la complejidad de los sistemas socioecológicos que lo componen exigen un diseño que articule coherentemente el propósito de la investigación, su alcance, las preguntas que la orientan, las estrategias de recolección y análisis de información, y los procedimientos de síntesis e interpretación. Este capítulo detalla cada uno de estos elementos y justifica su pertinencia metodológica en relación con el marco FMPEIR adoptado.

4.1 Propósito, alcance y preguntas de investigación

4.1.1 Propósito

El propósito central de la investigación es elaborar un diagnóstico integral del estado del medioambiente en El Salvador, integrando evidencia cuantitativa y cualitativa bajo la estructura analítica del modelo FMPEIR, y delinear perspectivas de sostenibilidad a corto plazo (1–3 años), mediano plazo (4–7 años) y largo plazo (8–15 años). Este propósito es simultáneamente descriptivo, en tanto busca caracterizar el estado actual de los componentes ambientales, y explicativo, en tanto busca identificar las relaciones causales entre fuerzas motrices, presiones, estados e impactos, y prospectivo, en tanto orienta el análisis hacia la identificación de trayectorias de cambio hacia la sostenibilidad. La orientación hacia la prospectiva normativa, señalada en el Capítulo II como rasgo

distintivo de las ciencias de la sostenibilidad (Kates et al., 2001), imprime al diseño un carácter aplicado que trasciende el diagnóstico para contribuir a la acción transformadora.

4.1.2 Alcance

El alcance de la investigación se define en tres dimensiones. En cuanto a la escala territorial, la unidad de análisis primaria es el país en su conjunto, con desagregación por cuencas hidrográficas para los componentes hídricos, en coherencia con el enfoque de gestión integrada por cuencas desarrollado en el Capítulo II, y por departamentos o municipios para los análisis de vulnerabilidad y distribución territorial de impactos. Esta escala múltiple permite capturar tanto las dinámicas estructurales nacionales como las heterogeneidades territoriales que son centrales para la identificación de poblaciones y ecosistemas en situación de mayor vulnerabilidad.

En cuanto a las dimensiones temáticas, la investigación cubre cinco grandes componentes ambientales: (1) clima y energía, incluyendo emisiones de gases de efecto invernadero, acceso energético y transición hacia fuentes renovables; (2) agua, incluyendo disponibilidad, calidad y gestión del recurso hídrico; (3) suelos y ecosistemas, incluyendo cobertura forestal, biodiversidad y degradación del suelo; (4) residuos y contaminación, incluyendo gestión de residuos sólidos, tratamiento de aguas residuales y contaminantes prioritarios; y (5) riesgos y vulnerabilidad, incluyendo exposición a eventos extremos, capacidad adaptativa y gestión del riesgo de desastres. Estas dimensiones se articulan entre sí a través del modelo FMPEIR, que identifica las interacciones sistémicas que los enfoques sectoriales tienden a invisibilizar.

En cuanto al horizonte temporal, la investigación trabaja con las series históricas disponibles, con una cobertura ideal del período 1990 al año más reciente publicado por cada fuente oficial. Este horizonte permite identificar tendencias de largo plazo, detectar quiebres estructurales en las series y evaluar el impacto de los principales hitos de política ambiental nacional e internacional sobre los indicadores de estado y presión.

4.1.3 Preguntas de investigación

El diseño metodológico se orienta por cuatro preguntas de investigación principales, derivadas directamente de la estructura del modelo FMPEIR y congruentes con los vacíos de conocimiento identificados en la justificación. La primera pregunta se refiere a las fuerzas motrices y presiones: ¿cuáles son los factores socioeconómicos, demográficos e institucionales que explican el deterioro o la transformación de los componentes ambientales en El Salvador durante el período de estudio? La segunda pregunta es sobre el estado actual: ¿qué evidencia empírica permite caracterizar la condición biofísica de los principales recursos naturales y ecosistemas del país? La tercera pregunta es acerca de los impactos: ¿qué efectos socioeconómicos, sanitarios y ecológicos se asocian documentadamente a los cambios de estado ambiental observados? La cuarta pregunta es respecto a las respuestas y sus brechas: ¿qué instrumentos de política, gestión e inversión existen para hacer frente a los problemas identificados, y cuáles son las brechas más significativas que persisten para avanzar hacia la sostenibilidad?

4.1.4 Herramientas e instrumentos

En el desarrollo metodológico del proyecto se empleó un conjunto articulado de instrumentos digitales orientados a garantizar rigurosidad analítica, trazabilidad de datos y eficiencia en el procesamiento de información. Para el análisis estadístico y la modelación de indicadores se utilizó el software R (a través de RStudio), mediante la implementación de scripts reproducibles que permitieron la depuración, estandarización, regresión lineal, análisis de tendencias, cálculo de pendientes estandarizadas y visualización gráfica de resultados (matrices cuadrantes, gráficos radar y proyecciones). Asimismo, se incorporó el uso de ChatGPT como herramienta de apoyo metodológico para la estructuración de categorías analíticas, revisión de estilo de la redacción, sistematización de hallazgos y verificación conceptual de marcos teóricos (DPSIR, ODS, ISO 14001), funcionando como asistente de apoyo en la organización y claridad del discurso científico, sin sustituir el criterio

experto del equipo investigador. Complementariamente, se utilizaron hojas de cálculo avanzadas (Microsoft Excel) para validación cruzada de resultados, gestores bibliográficos para el control de referencias en formato APA 7 y herramientas de visualización para la elaboración de gráficos temáticos. La integración de estas herramientas permitió fortalecer la consistencia metodológica, la transparencia en el tratamiento de datos y la calidad técnica del informe final.

4.2 Enfoque metodológico general

4.2.1 Diseño mixto secuencial explicativo

La investigación adopta un diseño metodológico mixto, en el sentido definido por Creswell y Plano Clark (2018): una estrategia de investigación que combina métodos cuantitativos y cualitativos con el propósito de obtener una comprensión más completa del fenómeno de estudio que la que podría alcanzarse con cualquiera de los dos enfoques por separado. La elección del enfoque mixto es coherente con las orientaciones metodológicas señaladas en la sección 2.9 del Capítulo II y responde a dos imperativos analíticos complementarios: la necesidad de establecer magnitudes, tendencias y relaciones causales entre variables ambientales, que los métodos cuantitativos abordan con mayor rigor, y la necesidad de capturar las dimensiones institucionales, políticas y culturales de los problemas ambientales, que los métodos cualitativos permiten interpretar con mayor profundidad.

La secuencia metodológica adoptada es de tipo explicativo: en una primera fase, el análisis cuantitativo de series de indicadores permite caracterizar el estado, las presiones y los impactos ambientales, identificando patrones, tendencias y anomalías estadísticamente significativas. En una segunda fase, el análisis cualitativo permite profundizar en la interpretación de los hallazgos cuantitativos, identificando los mecanismos causales, los actores relevantes, las dinámicas institucionales y los conflictos socioambientales que los indicadores numéricos no capturan.

Esta secuencia es coherente con el enfoque de las ciencias de la sostenibilidad (Kates et al., 2001; Clark y Dickson, 2003), que integra múltiples tipos de conocimiento para producir comprensión accionable sobre sistemas complejos.

4.2.2 Postura epistemológica

El diseño metodológico se sustenta en la postura epistemológica del realismo crítico señalada en el Capítulo II: se reconoce la existencia de procesos causales reales en los sistemas socioecológicos salvadoreños, al tiempo que se asume que el conocimiento sobre dichos procesos es siempre parcial, situado y sujeto a revisión. Esta postura justifica la triangulación de fuentes y métodos como estrategia para aproximarse progresivamente a una comprensión más completa y confiable del objeto de estudio, sin pretender una objetividad absoluta imposible en ciencias que involucran sistemas complejos y decisiones cargadas de valor. La triangulación opera en tres niveles: triangulación de fuentes de datos (múltiples bases de datos institucionales), triangulación de métodos (cuantitativo y cualitativo) y triangulación de perspectivas teóricas (desarrollo sostenible, ecología política y ciencias de la sostenibilidad).

4.3 Estrategia de recolección y sistematización de información

4.3.1 Fuentes de información cuantitativa

La evidencia cuantitativa se obtiene a partir de fuentes de datos oficiales internacionales y nacionales, priorizando aquellas que ofrecen series temporales largas, metodologías estandarizadas y comparabilidad internacional. La fuente principal es el Banco de Datos del Desarrollo Mundial (World Development Indicators, WDI) del BM, que provee series temporales comparables de los indicadores ambientales, socioeconómicos y demográficos de mayor relevancia para el análisis FMPEIR. Para los componentes de cobertura forestal y recursos hídricos, se com-

plementa con datos de la FAO (Global Forest Resources Assessment y AQUASTAT). Para las dimensiones energéticas, se recurre a las bases de la Agencia Internacional de Energía (IEA) y la CEPAL. Para los componentes de calidad ambiental y salud pública, se triangula con datos del Instituto para la Métrica y Evaluación de la Salud (IHME), la Organización Mundial de la Salud. Las bases de datos nacionales del MARN, el Ministerio de Economía y la DIGESTYC complementan la información internacional con datos específicos del contexto salvadoreño.

Para garantizar la consistencia y comparabilidad del conjunto de indicadores, se adopta el protocolo de documentación propuesto por la CEPAL (Quiroga Martínez, 2009): para cada indicador se registra la definición operacional exacta conforme a la fuente, el código del indicador en la base de datos correspondiente, la serie histórica disponible con indicación de años con datos faltantes, el valor más reciente disponible con su fecha de reporte, la tendencia estadística, y su categorización en el componente FMPEIR al que corresponde. Este protocolo garantiza la trazabilidad de los datos y facilita la reproducibilidad del análisis.

4.4 Tablero de indicadores cuantitativos FMPEIR

4.4.1 Indicadores núcleo

El tablero de indicadores cuantitativos constituye el instrumento central de la fase cuantitativa de la investigación. Se organiza conforme a los cinco componentes del modelo FMPEIR y distingue entre indicadores núcleo, un conjunto mínimo viable de indicadores con series históricas consistentes y cobertura temporal amplia, que garantizan la coherencia del análisis longitudinal, e indicadores complementarios, que robustecen el diagnóstico en dimensiones específicas cuando los datos están disponibles.

Los indicadores núcleo del componente de Fuerzas Motrices incluyen: la población total (WDI: SP.POP.TOTL) y la proporción de pobla-

ción urbana (SP.URB.TOTL.IN.ZS), como indicadores de la dinámica demográfica y de urbanización; el PIB per cápita en dólares corrientes (NY.GDP.PCAP.CD) y la estructura sectorial del valor agregado, participación de la agricultura (NV.AGR.TOTL.ZS) y la industria (NV.IND.TOTL.ZS) en el PIB,, como indicadores de la estructura económica. Para el componente de Presiones, los indicadores núcleo son: las emisiones totales de CO₂ en kilotoneladas (EN.ATM.CO2E.KT) y las emisiones per cápita (EN.ATM.CO2E.PC), como indicadores de la presión climática; la proporción de generación eléctrica a partir de combustibles fósiles (EG.ELC.FOSL.ZS), como indicador de la presión energética; y el porcentaje de aguas residuales tratadas (EN.WWT.TRD.ZS), como indicador de la presión hídrica. Para el componente de Estado, los indicadores núcleo son: la cobertura forestal como porcentaje del área terrestre (AG.LND.FRST.ZS), los recursos hídricos renovables internos per cápita en m³/habitante (ER.H2O.INTR.PC), y la proporción de electricidad generada a partir de fuentes renovables (EG.ELC.RNEW.ZS). Para los componentes de Impacto y Respuesta, los indicadores núcleo incluyen indicadores de acceso a saneamiento mejorado y agua potable segura, tasas de mortalidad atribuible a factores ambientales, trianguladas con datos del IHME y la OMS, y pérdidas económicas asociadas a desastres naturales.

4.4.2 Indicadores complementarios

Los indicadores complementarios amplían el diagnóstico en dimensiones específicas de cada componente FMPEIR. Para las Fuerzas Motrices, se incluyen indicadores de consumo de energía primaria, intensidad energética del PIB, remesas como porcentaje del PIB y densidad de población por departamento. Para las Presiones, se añaden indicadores de generación de residuos sólidos per cápita, tasa de recolección de residuos, uso de fertilizantes nitrogenados por hectárea agrícola, y extracción hídrica total por sectores de uso. Para el Estado, se incorporan indicadores de extensión de áreas naturales protegidas, índices de calidad del agua en los principales cuerpos de agua superficiales y métricas de biodiversidad disponibles a escala nacional. Para los Impactos, se añaden

den indicadores de inseguridad alimentaria, pérdidas agropecuarias por eventos climáticos extremos y población expuesta a riesgos ambientales. Para las Respuestas, se incluyen indicadores de inversión ambiental pública, número y cobertura de instrumentos de gestión ambiental vigentes, y acceso a combustibles limpios para cocinar, este último de especial relevancia dado el análisis ya realizado de las gráficas de acceso energético para El Salvador.

4.5 Análisis estadístico de las series de indicadores

4.5.1 Estadística descriptiva e identificación de patrones

El análisis cuantitativo de cada indicador comienza con una caracterización estadística descriptiva que incluye: medidas de tendencia central (promedio y mediana) y de dispersión (rango y desviación estándar) para la serie completa; comparación de promedios por subperíodos definidos a priori, 1990–2000, 2001–2010, 2011–2020, 2021–año más reciente, que permiten evaluar si la dinámica del indicador ha cambiado en relación con los principales hitos de política ambiental nacional e internacional; y visualización gráfica de la serie temporal con indicación de los eventos relevantes que pudieran haber generado quiebres o inflexiones. Esta capa descriptiva permite identificar patrones generales, valores atípicos y períodos de aceleración o desaceleración en los procesos estudiados, proporcionando la base sobre la cual se aplican los análisis de tendencia.

4.5.2 Análisis de tendencias

El análisis de tendencias se realiza en tres niveles de complejidad creciente, seleccionados en función de la extensión y calidad de cada serie. El primer nivel es la regresión lineal simple, con el año como variable independiente y el valor del indicador como variable dependiente, que permite estimar la pendiente de la tendencia (unidades de cambio

por año), su dirección (positiva o negativa) y su significancia estadística (valor p de la pendiente). El segundo nivel es el cálculo de la Tasa de Crecimiento Compuesta Anual, que mide el crecimiento promedio anual equivalente a lo largo del período considerando los valores de inicio y fin, y que complementa la regresión lineal para indicadores con dinámicas no lineales o exponenciales. El tercer nivel, aplicable cuando la extensión de la serie lo permite, es la detección de quiebres estructurales mediante pruebas estadísticas formales, como el test de Chow (Bai y Perron, 2003), que identifican cambios significativos en la tendencia o el nivel de las series, asociables a modificaciones en las fuerzas motrices, en las políticas o en las condiciones climáticas.

4.5.3 Interpretación integrada bajo el esquema FMPEIR

Los resultados del análisis estadístico no se interpretan de manera aislada para cada indicador, sino en el marco de las cadenas causales del modelo FMPEIR. Esta interpretación integrada busca establecer relaciones entre los patrones observados en diferentes componentes: si las emisiones de CO₂ per cápita muestran una tendencia creciente mientras la proporción de electricidad renovable también aumenta, el análisis señala los sectores, transporte, industria, uso residencial de combustibles fósiles, que explicarían la brecha. Si la cobertura forestal muestra una tendencia positiva en los últimos años, el análisis evalúa si este cambio es atribuible a políticas de restauración, a cambios en el uso del suelo o a variaciones en los métodos de medición. Si los recursos hídricos per cápita muestran tendencia decreciente, el análisis integra la presión demográfica con la variabilidad climática documentada y con los cambios en la cobertura forestal que afectan la recarga de acuíferos. Esta interpretación cruzada es la que confiere al análisis FMPEIR su capacidad para capturar la interdependencia sistémica de los problemas ambientales, superando la fragmentación del conocimiento señalada en la justificación.

4.6 Construcción del Índice Sistémico de Sostenibilidad Ambiental (ISSA)

4.6.1 Justificación y propósito del índice

Con el objetivo de sintetizar la evidencia empírica derivada del análisis FMPEIR y facilitar la interpretación estratégica para la toma de decisiones institucionales, la investigación propone la construcción de un ISSA. Este índice integra las cinco dimensiones del modelo FMPEIR en un indicador compuesto que permite evaluar de manera agregada el desempeño ambiental nacional y comparar escenarios prospectivos. El ISSA no pretende reemplazar los indicadores individuales, cuyo análisis desagregado provee la riqueza interpretativa necesaria para identificar prioridades de política sectorial, sino ofrecer una medida sintética que capture tendencias estructurales y comunique el estado general de la sostenibilidad ambiental a audiencias institucionales y ciudadanas con menor capacidad para procesar indicadores desagregados.

La construcción de índices compuestos de sostenibilidad ambiental tiene precedentes consolidados en la literatura internacional, incluyendo el Environmental Sustainability Index (Esty y Córdova-Novion, 2012), los indicadores compuestos de la OCDE (Freudenberg, 2003; Nardo et al., 2005; OCDE/JRC, 2008) y las guías metodológicas para indicadores de desarrollo sostenible de la CEPAL (Quiroga Martínez, 2009). El ISSA se construye siguiendo los estándares metodológicos establecidos en el Handbook on Constructing Composite Indicators de la OCDE (2008), que distingue cuatro etapas: selección de indicadores, normalización, agregación y análisis de sensibilidad.

4.6.2 Etapas de construcción del ISSA

La primera etapa es la selección de indicadores representativos. Se seleccionan indicadores con series temporales consistentes y relevancia estadística demostrada, garantizando que cada dimensión del FMPEIR esté representada por al menos dos indicadores: para las Fuerzas Mo-

trices, la tasa de urbanización y el PIB per cápita; para las Presiones, las emisiones de CO₂ per cápita y la proporción de electricidad de origen fósil; para el Estado, la cobertura forestal y los recursos hídricos renovables per cápita; para los Impactos, la mortalidad atribuible a factores ambientales y el acceso a saneamiento seguro; y para las Respuestas, el acceso a combustibles limpios para cocinar y la cobertura de servicios de agua potable. La inclusión de indicadores de respuesta en el índice es metodológicamente relevante porque refleja el propósito normativo de la investigación: medir no solo la condición actual del sistema ambiental, sino también la capacidad de respuesta institucional que determina sus perspectivas de mejora.

La segunda etapa es la normalización, que convierte los indicadores con diferentes unidades y magnitudes a una escala común comparable. Se adopta el método min-max, que transforma cada valor observado (X_i) en un índice normalizado (IS_i) mediante la fórmula $IS_i = (X_i - \min(X)) / (\max(X) - \min(X))$, donde $\min(X)$ y $\max(X)$ representan los valores mínimo y máximo de la serie histórica del indicador. Para los indicadores cuyo aumento representa un deterioro ambiental, como las emisiones de CO₂ o la proporción de electricidad fósil, la escala se invierte aplicando la transformación $IS_i = 1 - [(X_i - \min(X)) / (\max(X) - \min(X))]$, de modo que valores más altos del índice normalizado correspondan siempre a mejores condiciones de sostenibilidad, independientemente de la dirección del indicador original.

La tercera etapa es la agregación por dimensión, que calcula para cada componente FMPEIR (D_k) el promedio de los índices normalizados de los indicadores que lo integran: $D_k = (\sum IS_k) / n_k$, donde n_k es el número de indicadores de la dimensión k . El promedio simple se adopta como valor de referencia, aunque se exploran también ponderaciones alternativas cuando existen argumentos sustantivos para asignar mayor peso a determinados indicadores, por ejemplo, mayor peso a los indicadores de Estado en las dimensiones donde la evidencia científica señala riesgos de irreversibilidad. La cuarta etapa es la construcción del índice global mediante la agregación de las cinco dimensiones: $ISSA = (wF \cdot DF + wP \cdot DP + wE \cdot DE + wI \cdot DI + wR \cdot DR)$, donde w_k son los pesos asignados a

cada dimensión. En ausencia de ponderaciones normativas consensuadas, se adopta inicialmente una ponderación uniforme ($w_k = 0.20$ para cada dimensión), y se efectúan análisis de sensibilidad que evalúan la robustez de los resultados ante diferentes esquemas de ponderación.

4.6.3 Interpretación del ISSA y análisis de sensibilidad

El ISSA adopta un rango continuo entre 0 y 1, con cuatro categorías de interpretación: sostenibilidad estructural baja (0.00–0.39), que indica que el sistema ambiental enfrenta presiones severas, su estado es crítico y las capacidades de respuesta son insuficientes; sostenibilidad intermedia (0.40–0.59), que indica avances parciales coexistentes con brechas significativas en al menos dos de las dimensiones FMPEIR; sostenibilidad consolidada (0.60–0.79), que refleja un desempeño relativamente favorable en la mayoría de las dimensiones con brechas manejables; y sostenibilidad avanzada (0.80–1.00), que corresponde a sistemas con presiones bajas, buen estado de los ecosistemas, impactos limitados y respuestas institucionales robustas. Esta clasificación permite evaluar la evolución temporal del ISSA a lo largo de la serie histórica disponible, comparar los valores del índice bajo los tres escenarios prospectivos definidos en la sección 3.7 y comunicar los resultados a audiencias no especializadas de manera sintética y accesible.

El análisis de sensibilidad evalúa la estabilidad de los resultados del ISSA ante: variaciones en los pesos de las dimensiones y los indicadores; variaciones en los valores de referencia mínimos y máximos utilizados en la normalización; y exclusión o inclusión de indicadores específicos. Esta evaluación permite identificar cuáles dimensiones o indicadores tienen mayor influencia sobre el valor final del índice y, por tanto, cuáles representan las palancas de cambio más eficaces para mejorar el desempeño ambiental del país (Saisana y Tarantola, 2002). El análisis de sensibilidad es un requisito metodológico fundamental para que el ISSA sea utilizado responsablemente como herramienta de política pública, sin atribuirle una precisión mayor a la que sus supuestos metodológicos permiten sustentar.

4.7 Construcción de escenarios prospectivos de sostenibilidad

4.7.1 Marco conceptual y función de los escenarios

La construcción de escenarios prospectivos constituye la dimensión más explícitamente normativa del diseño metodológico, coherente con el propósito de las ciencias de la sostenibilidad de no limitarse al diagnóstico del pasado, sino de contribuir a la orientación del futuro (Kates et al., 2001). Los escenarios no son predicciones, el comportamiento de los sistemas socioecológicos es inherentemente no determinístico, sino narrativas estructuradas sobre futuros posibles que sirven para identificar consecuencias de diferentes trayectorias de decisión, revelar puntos de inflexión críticos y facilitar el diálogo entre actores con distintas visiones sobre el futuro ambiental del país. Cada escenario se construye especificando los supuestos sobre las fuerzas motrices, y su evolución posible bajo distintas condiciones— y proyectando sus efectos esperados sobre las presiones, el estado, los impactos y las respuestas a lo largo de los horizontes temporales definidos.

4.7.2 Los tres escenarios

El escenario de continuidad o tendencial asume la persistencia de las tendencias actuales en las fuerzas motrices sin modificaciones significativas en los marcos de política o en los patrones de inversión. Bajo este escenario, se proyecta la continuación de las presiones derivadas de la urbanización acelerada y la demanda hídrica creciente, avances graduales e incrementales en la proporción de energías renovables en la matriz eléctrica, insuficientes para compensar el crecimiento de la demanda total y brechas persistentes en saneamiento, gestión de residuos y restauración ecosistémica. El valor proyectado del ISSA bajo este escenario sirve como línea de base para evaluar el impacto marginal de los otros dos escenarios.

El escenario de transición acelerada asume la implementación coordinada de un paquete de políticas e inversiones públicas y privadas en cinco áreas prioritarias: saneamiento e infraestructura hídrica, transición energética, economía circular, restauración ecosistémica y movilidad sostenible urbana. Este escenario incorpora también el fortalecimiento significativo de los sistemas de monitoreo ambiental, con datos abiertos y tableros institucionales de seguimiento, como condición habilitante para la efectividad de las respuestas. La proyección de los indicadores bajo este escenario requiere establecer metas cuantitativas específicas para cada dimensión del FMPEIR, coherentes con los compromisos internacionales de El Salvador bajo la Agenda 2030 y el Acuerdo de París.

El escenario de estrés climático intensificado asume una trayectoria de calentamiento global superior, consistente con el escenario RCP 6.0 o SSP3 del IPCC, que se traduce en mayor frecuencia e intensidad de sequías e inundaciones en el territorio salvadoreño, presión agravada sobre los sistemas agrícolas y los recursos hídricos, y mayores demandas sobre los sistemas de protección civil y salud pública. Este escenario sirve para evaluar la robustez de las estrategias de adaptación ante condiciones climáticas más adversas que las proyectadas bajo supuestos moderados, y para identificar los componentes ambientales y los territorios con mayor riesgo de superar umbrales de irreversibilidad bajo estas condiciones.

4.8 Consideraciones éticas y criterios de calidad

4.8.1 Consideraciones éticas

La calidad del análisis cuantitativo se evalúa conforme a criterios de validez (que los indicadores seleccionados midan efectivamente los constructos que se pretenden medir) y confiabilidad (que los datos provengan de fuentes oficiales con metodologías documentadas y reproducibles). La calidad del análisis se evalúa conforme a criterios de credibilidad —coherencia entre los hallazgos y la perspectiva de los participantes—, transferibilidad (descripción suficientemente densa del

contexto para que los resultados sean comparables con otros contextos) y confirmabilidad (trazabilidad de los hallazgos a los datos originales). La calidad del ISSA se evalúa mediante el análisis de sensibilidad descrito en la sección 3.6.3.

Capítulo 5. Resultados: Análisis multidimensional de indicadores ambientales

El presente capítulo expone los resultados del análisis estadístico de series temporales para el período 2000–2024 en El Salvador, organizado conforme a las cinco dimensiones del modelo FMPEIR. De los indicadores evaluados, únicamente aquellos con tendencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) y con robustez confirmatoria son considerados en la interpretación, en cumplimiento del protocolo metodológico establecido en el Capítulo III. Los resultados se estructuran en siete bloques analíticos: (1) hallazgos generales y síntesis del ranking; (2) agua, saneamiento e higiene (WASH); (3) transición energética y combustibles limpios; (4) uso del suelo y cobertura forestal; (5) emisiones de gases de efecto invernadero; (6) recursos hídricos y capital natural ajustado; y (7) biodiversidad y ecosistemas. Cada bloque incluye la interpretación causal bajo el esquema FMPEIR y su articulación con el marco teórico del Capítulo II.

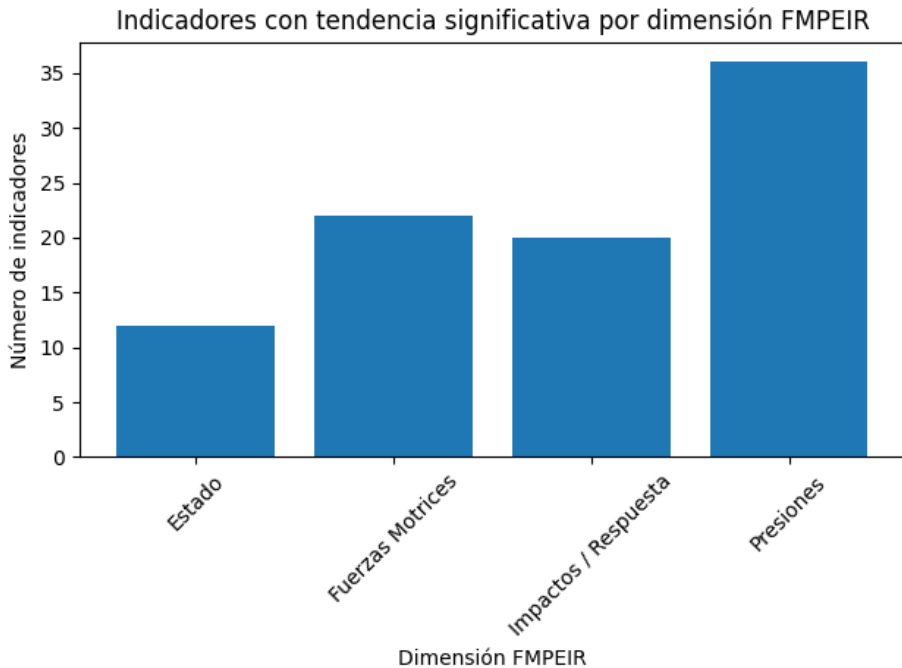
5.1 Caracterización de los hallazgos generales y síntesis del ranking

El análisis de series temporales para el período 2000–2024 revela que las tendencias con mayor robustez estadística ($p < 0.05$) en El Salvador no se distribuyen uniformemente entre todos los componentes del FMPEIR, sino que se concentran de manera sistemática en dos dimensiones: la transición sanitaria, acceso a agua segura, saneamiento y combustibles limpios, y la transición energética doméstica. Este patrón de concentración tiene implicaciones analíticas de primer orden: las Respuestas (R) articuladas en torno a la provisión de servicios básicos han generado cambios estructurales medibles en los Impactos (I) sobre la salud pública, mientras que los indicadores de Estado (E) biofísico, cobertura fores-

tal, calidad hídrica, biodiversidad, exhiben dinámicas de deterioro más graduales, cuya señal estadística es menos inmediata pero no menos relevante para la sostenibilidad de largo plazo.

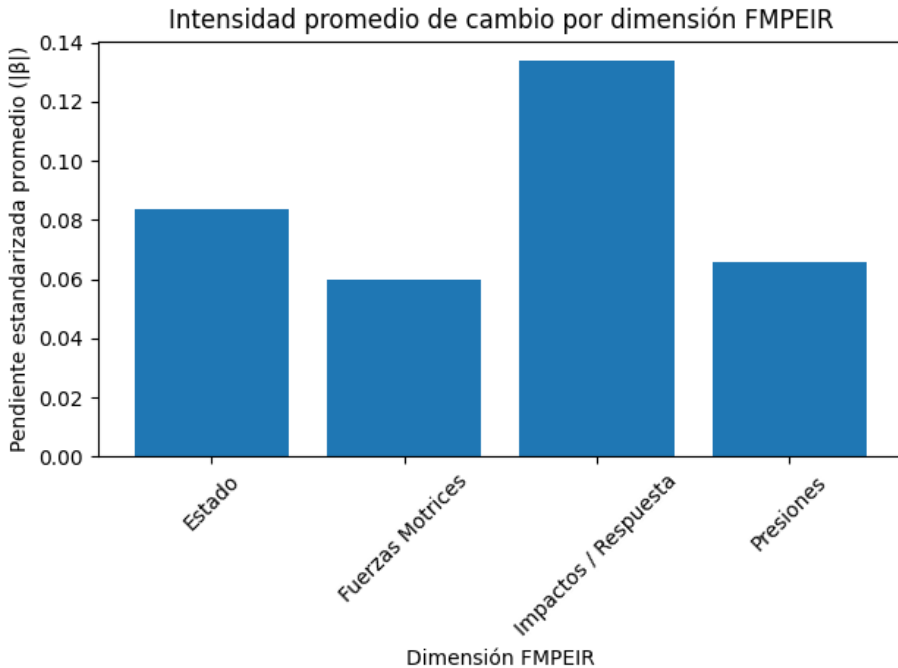
Los primeros 14 puestos del ranking de significancia corresponden al bloque WASH y a los indicadores de combustibles limpios, confirmando que la transformación ambiental más documentable del siglo XXI en El Salvador ha ocurrido en la dimensión sociosanitaria. Este hallazgo debe leerse en clave sistémica: los avances en servicios básicos no compensan las brechas persistentes en los componentes de presión y estado ambiental, erosión del suelo, calidad hídrica, pérdida forestal, que se analizan en las secciones siguientes.

Figura 1. Ranking de indicadores con mayor significancia estadística ($p < 0.05$)



Las primeras posiciones corresponden sistemáticamente al bloque WASH y combustibles limpios, revelando la concentración de las tendencias más robustas en la dimensión socio-sanitaria.

Figura 2. Distribución de indicadores significativos por dimensión FMPEIR



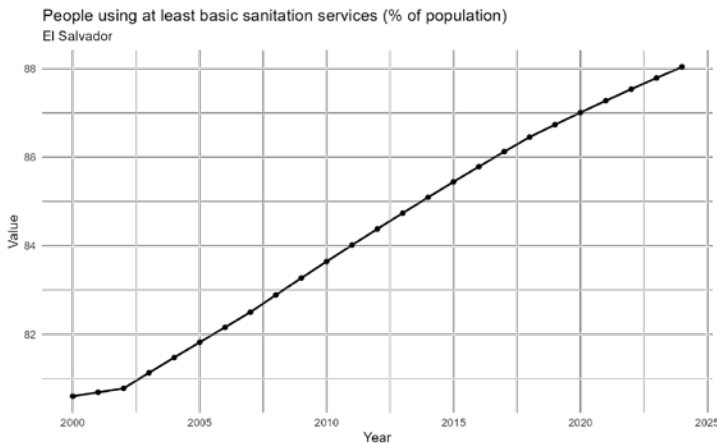
La dimensión de Impactos-Respuesta (servicios básicos y salud) concentra la mayor densidad de tendencias robustas; los componentes de Estado biofísico presentan menor representación en el ranking de corto plazo.

5.2 Dimensión WASH: La transición sanitaria

El bloque WASH domina los primeros puestos del ranking de significancia. La trayectoria convergente revela una cadena causal FMPEIR completa: las Fuerzas Motrices de urbanización y crecimiento demográfico generaron históricamente una Presión sobre los sistemas de saneamiento que se materializó en contaminación fecal de cuerpos de agua y alta incidencia de enfermedades gastrointestinales (Impacto). La Respuesta institucional, programas de infraestructura, inversión multilateral, ha generado un cambio de Estado en el acceso a servicios que se refleja en la reducción de los impactos sanitarios. Es fundamental, sin embargo, contrastar este avance con el dato del capítulo introductorio: menos del 20 % de las aguas residuales reciben tratamiento, lo que significa que el acceso a saneamiento mejorado no equivale a tratamiento efectivo de los efluentes.

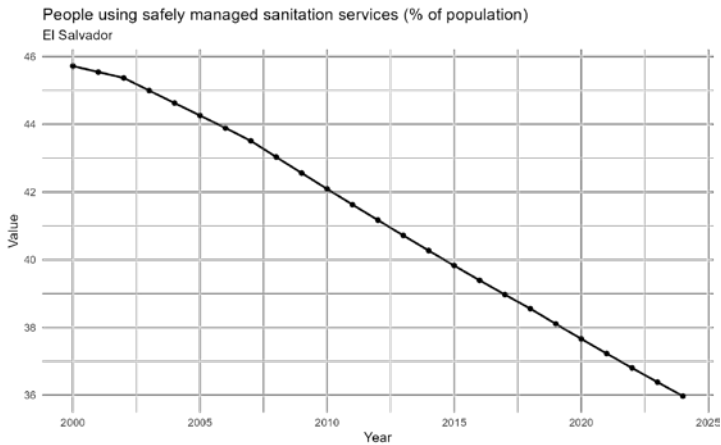
5.2.1 Saneamiento, higiene y agua segura

Figura 3. Acceso a servicios de higiene básica (SH.STA.HYGN, % población)



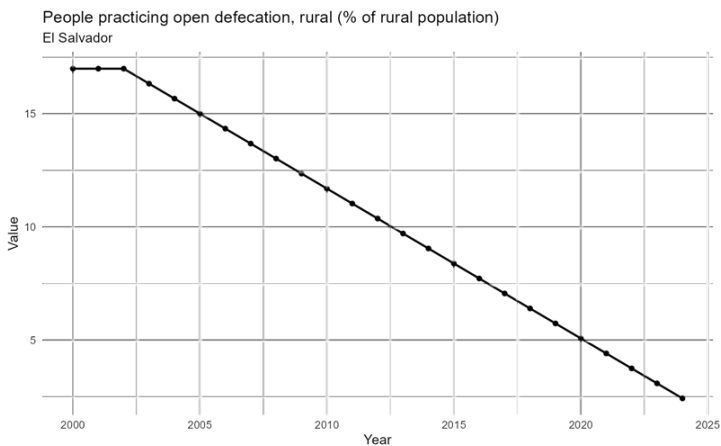
Tendencia ascendente con alta significancia estadística ($p < 0.01$). La aceleración de la pendiente en 2010–2022 coincide con los compromisos del ODS 6.

Figura 4. Saneamiento gestionado de forma segura (SH.STA.SMSS)

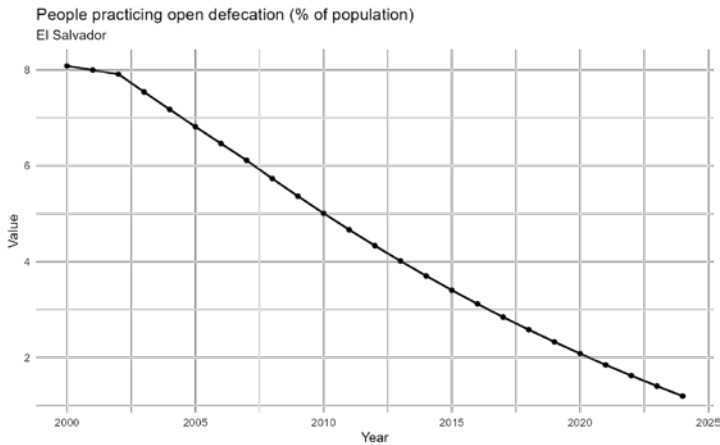


La tendencia positiva refleja mejoras cualitativas en la gestión de residuos sanitarios más allá del mero acceso a instalaciones.

Figura 5. Defecación al aire libre en la zona rural (% de población rural).



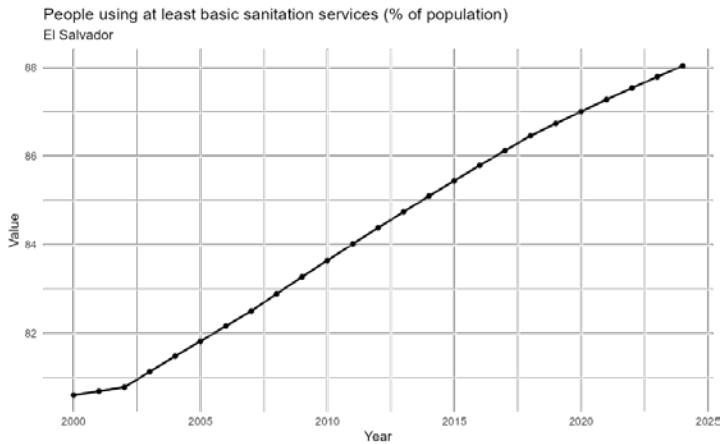
La reducción drástica constituye el indicador de mayor magnitud de cambio absoluto del período, con implicaciones directas sobre la carga de enfermedad gastrointestinal.

Figura 6. Defecación al aire libre en el total nacional (%)

La tendencia decreciente confirma la universalidad del proceso de transición sanitaria, con convergencia entre áreas urbanas y rurales en los últimos años.

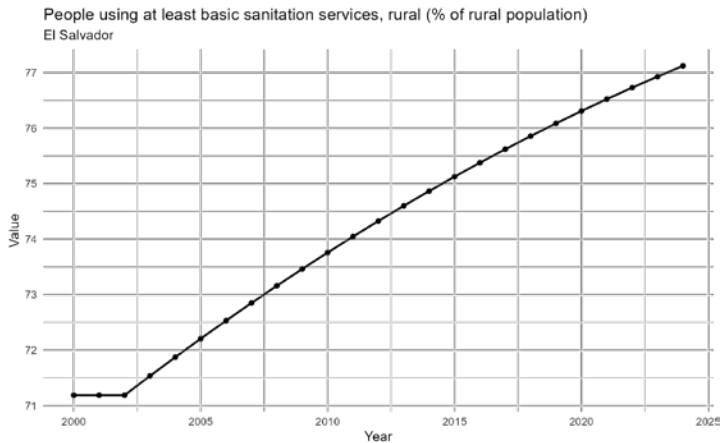
Los datos reflejan una trayectoria convergente: una disminución drástica y sostenida de la defecación al aire libre (SH.STA.ODFC) y de los servicios de saneamiento no mejorados, correlacionada proporcionalmente con el aumento del acceso a servicios básicos y gestionados de forma segura. Esta tendencia no es meramente estadística; responde a una transformación estructural de la infraestructura sanitaria nacional.

Figura 7. Saneamiento al menos básico (SH.STA.BASS.ZS, % población)



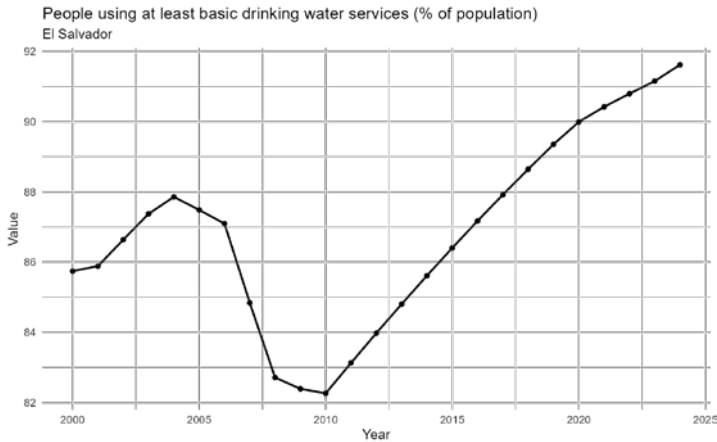
La expansión tiene implicaciones directas sobre la reducción de la exposición a patógenos de origen fecal-oral.

Figura 8. Saneamiento básico rural (% población rural)



La brecha rural-urbana se ha reducido significativamente, aunque persisten rezagos en municipios de alta dispersión.

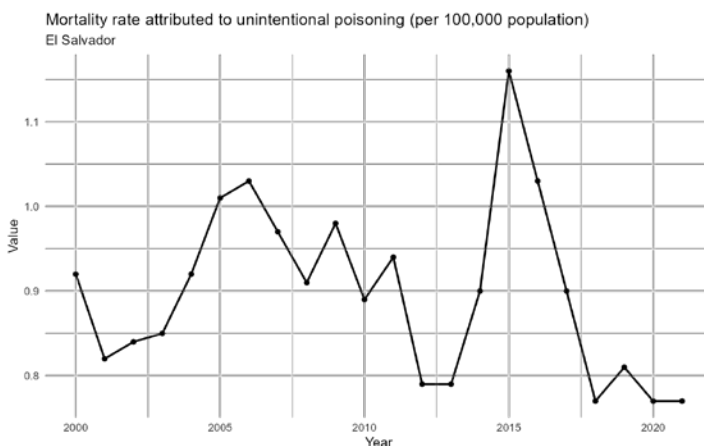
Figura 9. Agua potable gestionada de forma segura (SH.H2O.SMDW.ZS)



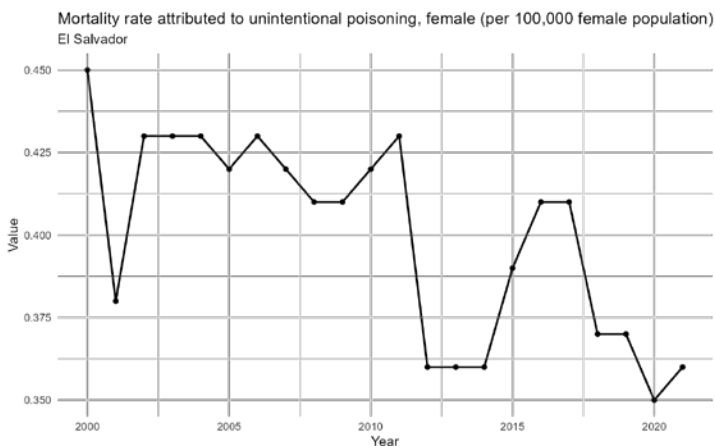
El acceso a agua tratada libre de contaminación en el punto de uso es el indicador de mayor relevancia para la prevención de enfermedades de transmisión hídrica.

5.2.2 Mortalidad atribuible a causas ambientales

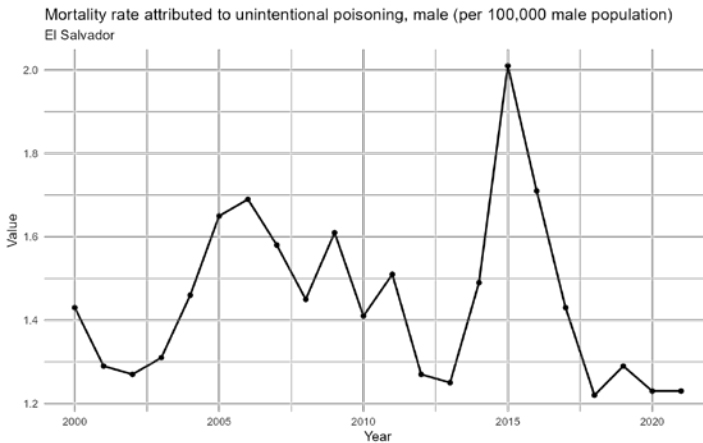
La pendiente negativa robusta de la mortalidad atribuible a causas ambientales es el resultado sistémico de las mejoras en saneamiento, agua segura y calidad del aire interior. Bajo el FMPEIR, confirma que las Respuestas (R) en servicios básicos han generado mejoras medibles en el componente de Impacto (I) socio-sanitario.

Figura 10. Mortalidad atribuible a factores ambientales (SH.STA.POIS.P, tasa por 100,000)

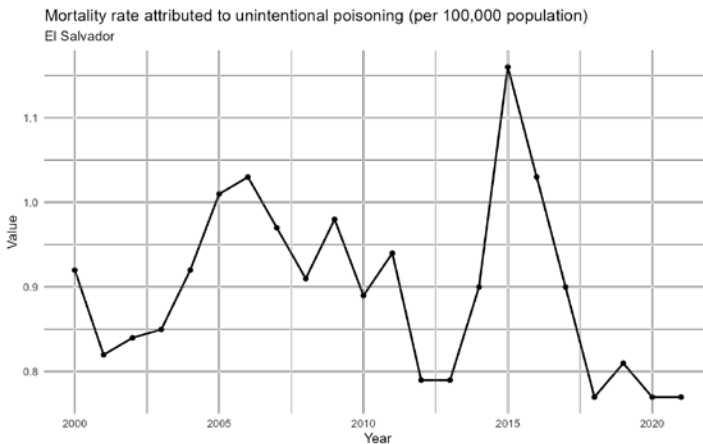
La tendencia decreciente con alta significancia confirma que los avances en saneamiento, agua potable y combustibles limpios han tenido impactos directos en la carga de enfermedad de origen ambiental.

Figura 11. Mortalidad femenina atribuible a envenenamiento accidental

Tasa consistentemente menor que la masculina, con tendencia estable, coherente con la hipótesis de reducción de exposición a contaminantes intramuros.

Figura 12. Mortalidad masculina atribuible a envenenamiento accidental

Los valores superiores y la mayor variabilidad reflejan diferencias en los patrones de exposición laboral y ambiental, relevantes para el análisis de justicia ambiental del Capítulo II.

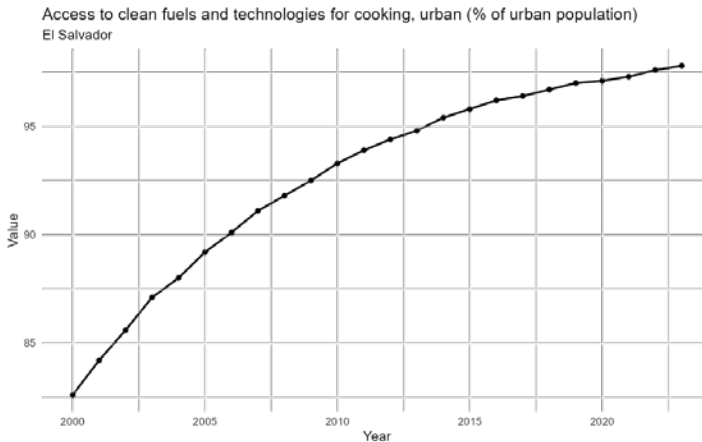
Figura 13. Mortalidad global por envenenamiento accidental (total)

La tendencia descendente general confirma la robustez del hallazgo al nivel de la población total.

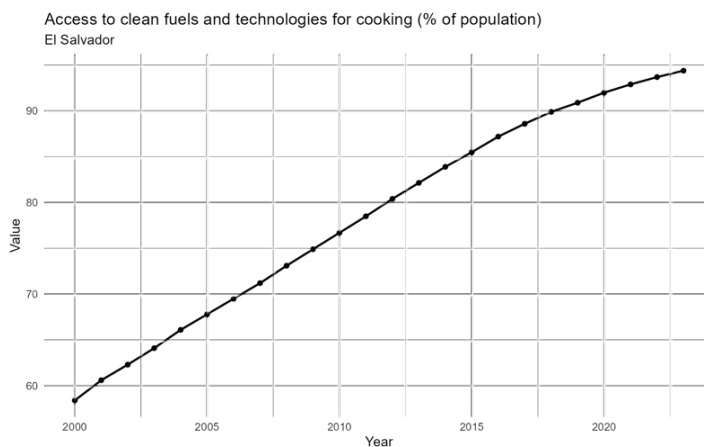
5.3 Transición energética doméstica y combustibles limpios

El acceso a combustibles limpios (EG.CFT.ACCS) ocupa tres posiciones en el top-15 del ranking, con las variables de acceso total, rural y urbano mostrando pendientes positivas altamente significativas. El crecimiento sostenido marca el declive de la dependencia de la biomasa tradicional (leña), con doble impacto ambiental y sanitario: epidemiológico —reducción de la exposición a PM2.5 intramuros—, y ecológico —menor presión extractiva sobre remanentes de bosque seco—. La desagregación por zona revela convergencia con equidad territorial: el área rural registró el mayor incremento absoluto, desde aproximadamente 30–40 % a inicios del período hasta 80–90 % en los años recientes, reduciendo la histórica brecha de acceso entre campo y ciudad.

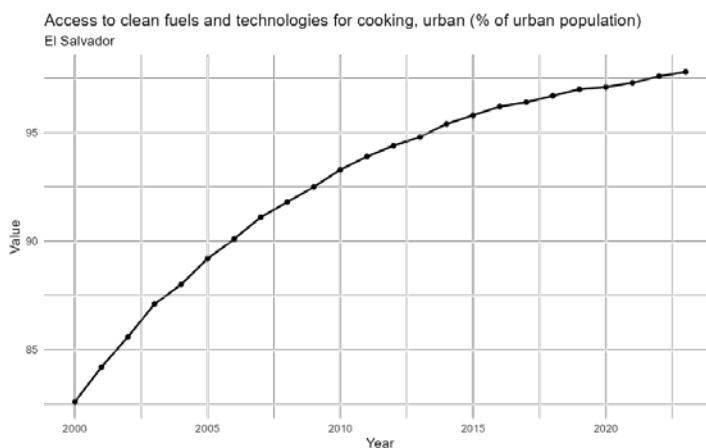
Figura 14. Acceso a combustibles y tecnologías limpias para cocinar en el total (%)



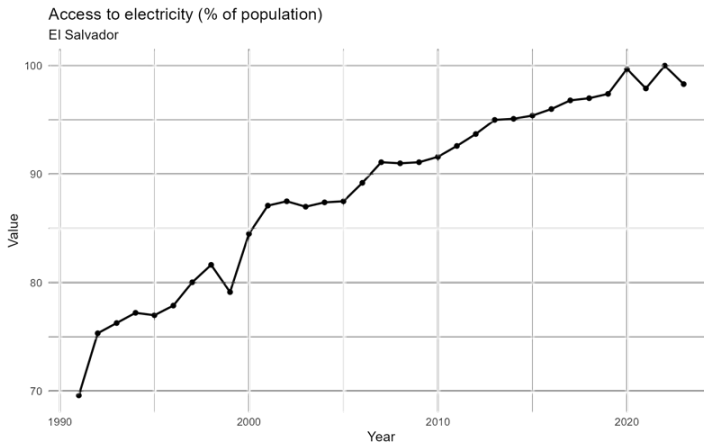
Tendencia ascendente sostenida con alta significancia estadística, reflejando la sustitución progresiva de biomasa por GLP y electricidad.

Figura 15. Acceso a combustibles limpios para cocinar en la zona rural (% de población rural)

El mayor incremento absoluto ocurre en el ámbito rural, que exhibe la mayor tasa de cambio del indicador.

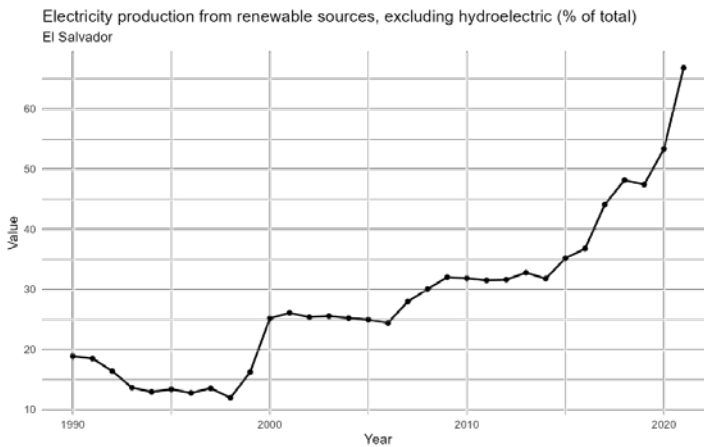
Figura 16. Acceso a combustibles limpios para cocinar en la zona urbana (% de población urbana)

El área urbana alcanza la universalización en los años recientes, con variabilidad mínima.

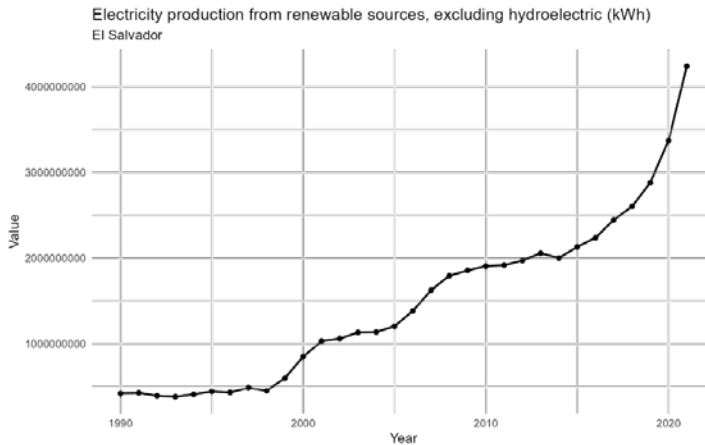
Figura 17. Acceso a electricidad (% de población total)

La expansión desde el 70–75 % a más del 95 % es coherente con el avance en la matriz renovable documentado en el capítulo introductorio.

5.3.2 Producción eléctrica renovable

Figura 18. Producción de electricidad renovable excluyendo hidroeléctrica (% total).

La transformación estructural revela la geotermia como primera palanca de cambio y la solar fotovoltaica como motor más reciente.

Figura 19. Producción de electricidad renovable en términos absolutos (kWh)

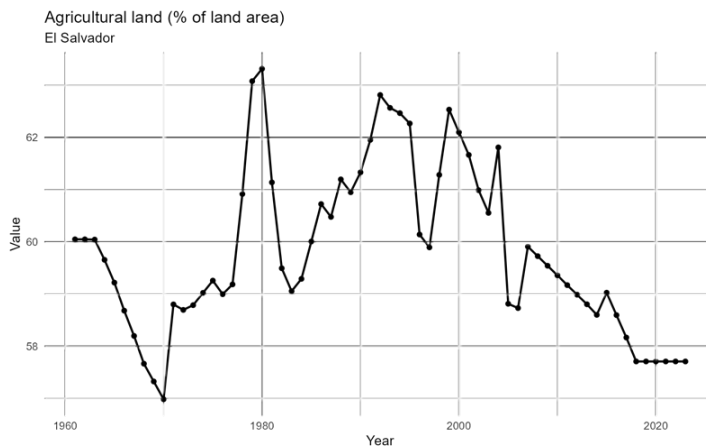
El crecimiento cuantitativo confirma que la mayor participación relativa de las renovables responde a un aumento real en generación limpia, no solo a cambios en la composición del mix.

5.4 Uso del suelo, cobertura forestal y degradación ecosistémica

Los indicadores de uso del suelo y cobertura forestal constituyen el componente de estado (E) más directamente vinculado a la resiliencia ecosistémica. Los resultados revelan estabilidad aparente en la estructura agraria, combinada con pérdida forestal sostenida y expansión de la tierra arable, con implicaciones sistémicas sobre la regulación hídrica, la captura de carbono y el control de erosión. Bajo el FMPEIR, la estabilización de la superficie agrícola no equivale a desaparición de la presión sobre los ecosistemas naturales: se desplaza hacia la intensificación de los sistemas existentes y hacia las zonas forestales de menor productividad.

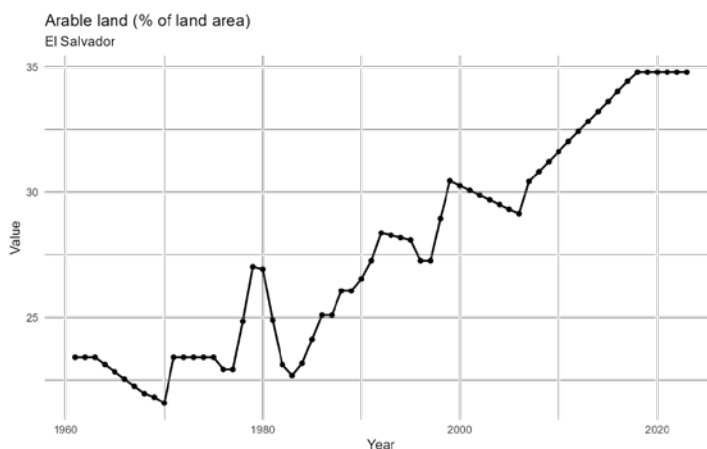
5.4.1 Estructura de uso del suelo

Figura 20. Superficie agrícola como porcentaje del área total (1960–2022)



La estabilidad relativa indica que la estructura de ocupación del suelo ha mantenido su orientación agroproductiva. La ausencia de tendencia en este indicador contrasta con las tendencias negativas en calidad del suelo y cobertura forestal.

Figura 21. Tierra arable como porcentaje del área total

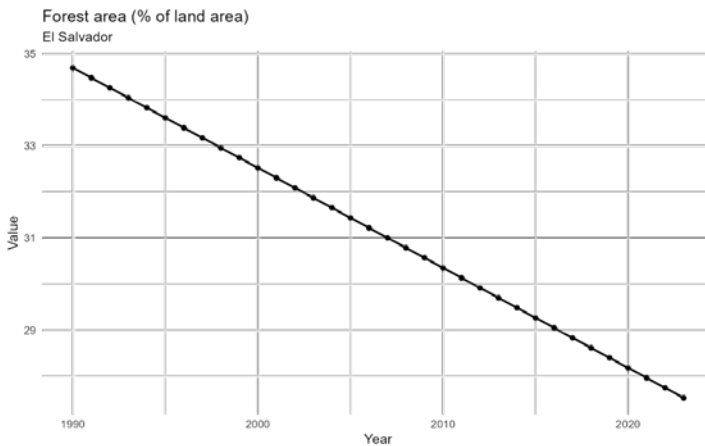


La tendencia creciente sostenida desde el 22 % histórico hasta valores cercanos al 35 % refleja la intensificación agroproductiva y la incorporación de nuevas tierras al uso agrícola.

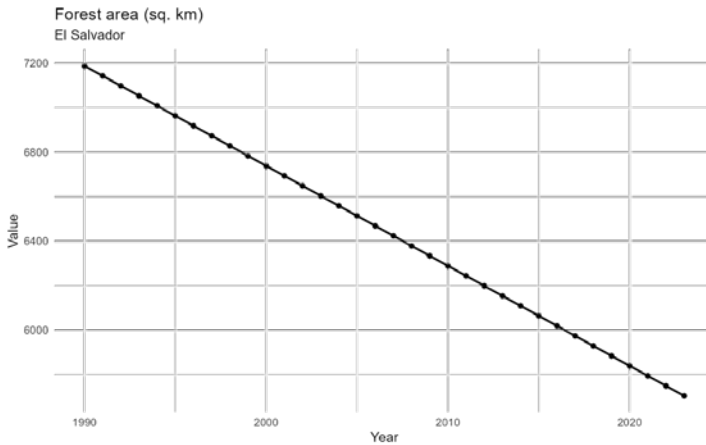
5.4.2 Cobertura forestal

El área forestal como porcentaje del territorio muestra una tendencia descendente constante entre 1990 y 2020, de aproximadamente 35 % a 28 %. La pérdida acumulada de 7 puntos porcentuales representa en términos absolutos una reducción de aproximadamente 1,400 km² de cobertura boscosa en tres décadas, con pérdida de capacidad de regulación hídrica, captura de carbono y hábitat para biodiversidad.

Figura 22. Área forestal como porcentaje del territorio (1990–2020)

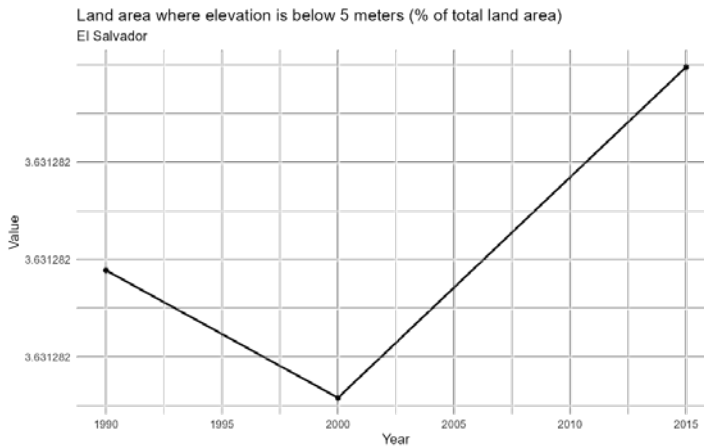


La tendencia descendente constante con reducción acumulada de 7 puntos cuantifica la pérdida neta de cobertura boscosa en tres décadas.

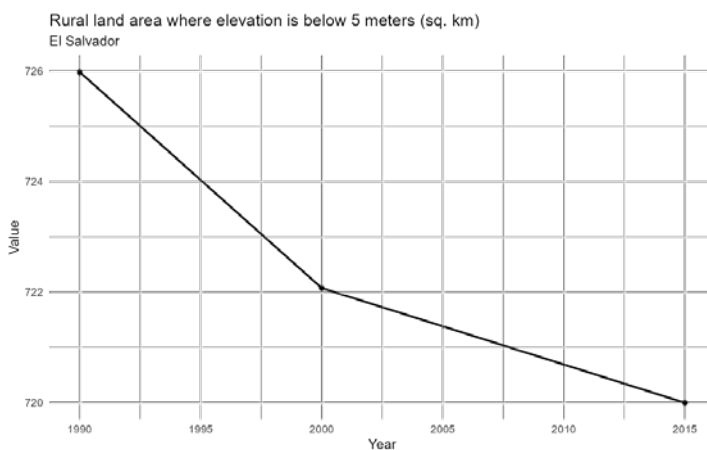
Figura 23. Área forestal en km²

La representación absoluta dimensiona el alcance territorial: 1,400 km² menos en tres décadas, con implicaciones directas sobre los servicios ecosistémicos de regulación documentados en el capítulo introductorio.

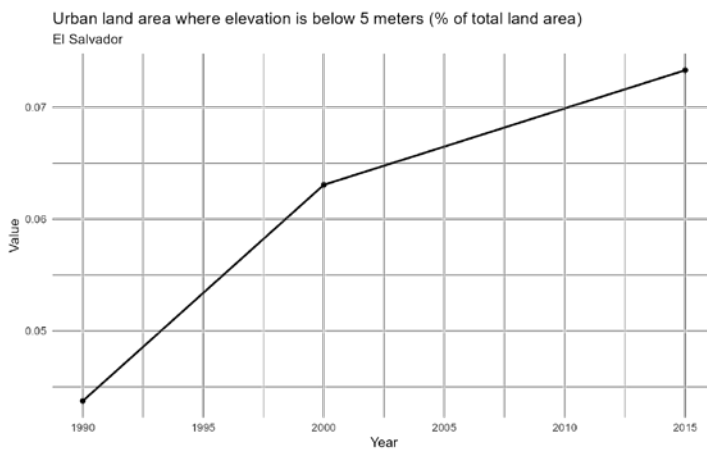
5.4.3 Exposición territorial a riesgo costero

Figura 24. Área terrestre a menos de 5 metros sobre el nivel del mar (% total)

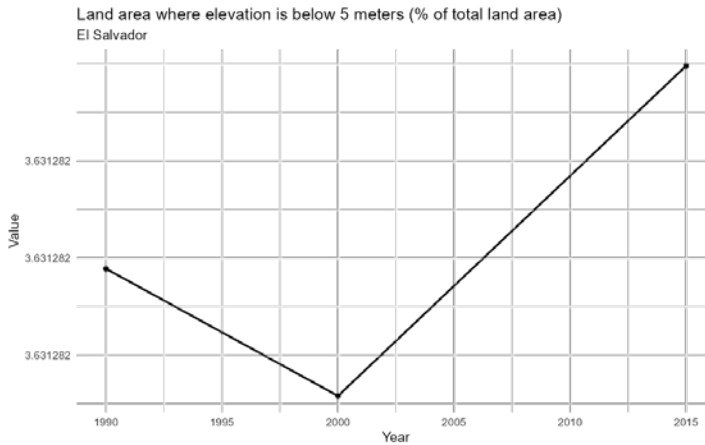
La constancia refleja estabilidad de la línea costera actual. Su relevancia es prospectiva: el 3,63 % del territorio a esta elevación enfrenta riesgos de inundación bajo escenarios de elevación acelerada del nivel del mar.

Figura 25. Área rural a menos de 5 metros de elevación (km²)

La ligera tendencia decreciente refleja la urbanización de zonas costeras bajas y cambios en la delimitación estadística.

Figura 26. Área urbana a menos de 5 metros de elevación (% total)

La tendencia creciente refleja la urbanización de zonas costeras bajas, con implicaciones para la vulnerabilidad ante eventos de inundación costera.

Figura 27. Síntesis de la estructura territorial

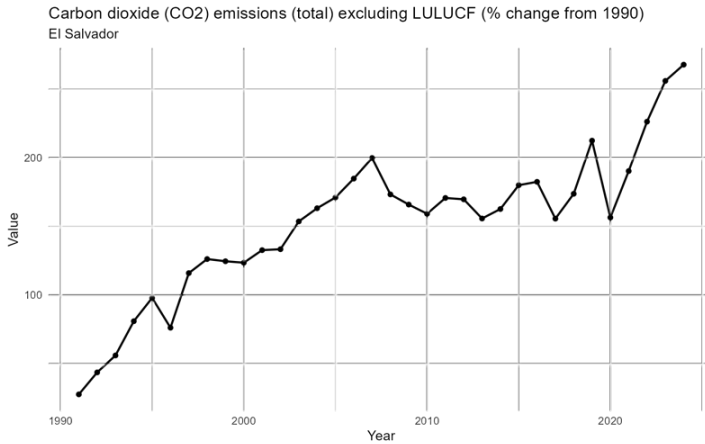
La combinación de estabilidad agrícola, intensificación productiva y reducción forestal configura el perfil de presión territorial característico de países con alta densidad demográfica.

5.5 Emisiones de GEI

El bloque de GEI ofrece la perspectiva más completa sobre el componente de Presión (P) climática. Los resultados revelan un patrón heterogéneo: las emisiones totales muestran tendencia creciente de largo plazo, pero el análisis desagregado por sector identifica trayectorias diferenciadas. Las emisiones del sector uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura (LULUCF) exhiben comportamiento decreciente coherente con la desaceleración de la deforestación; el sector transporte muestra el crecimiento más acelerado y constituye la principal brecha de descarbonización. La intensidad de carbono del PIB muestra reducción progresiva desde 1990, desacoplamiento relativo, aunque las emisiones absolutas continúan creciendo.

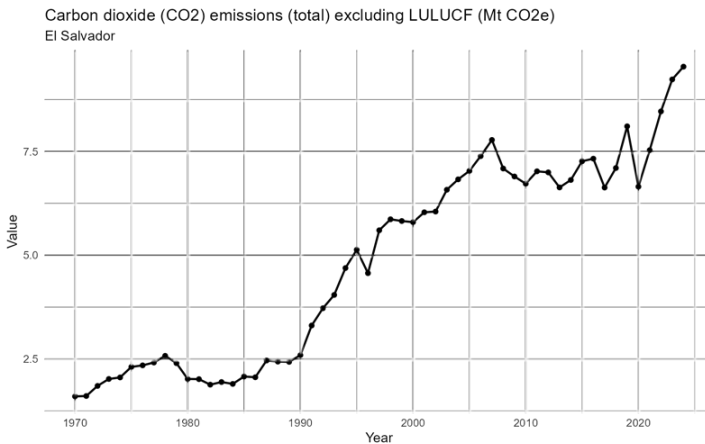
5.5.1 Emisiones totales y por sector

Figura 28. Emisiones totales de CO₂ excluyendo LULUCF y su cambio desde 1990 (%)

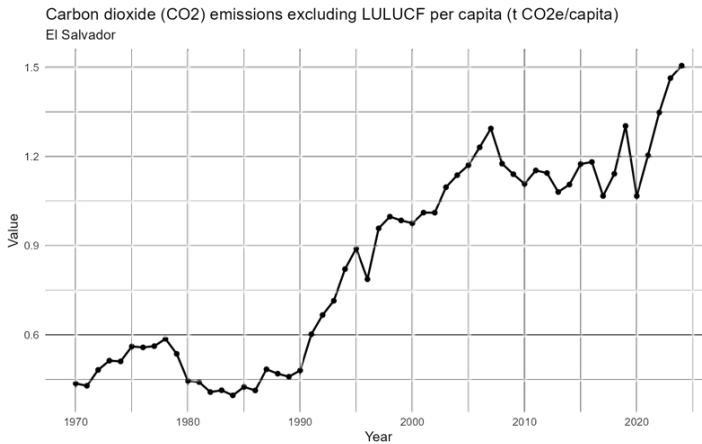


Las fases de crecimiento reflejan la expansión económica; la inflexión de 2008–2009 corresponde a la recesión global.

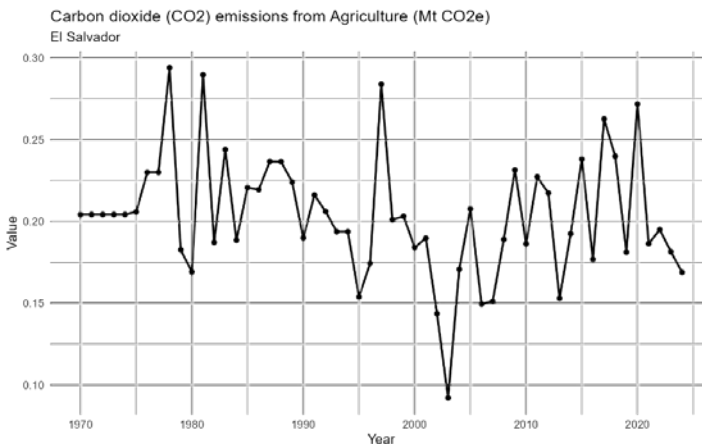
Figura 29. Emisiones totales de CO₂ excluyendo LULUCF (Mt CO₂e)



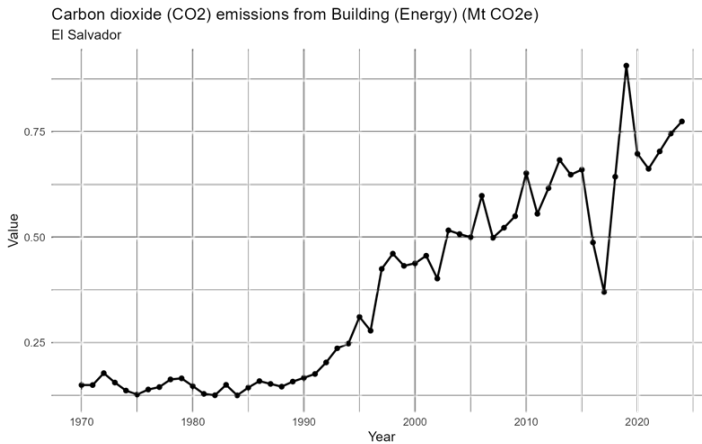
Tendencia creciente de largo plazo impulsada principalmente por transporte y generación eléctrica

Figura 30. Emisiones de CO₂ per cápita (t CO₂e/habitante)

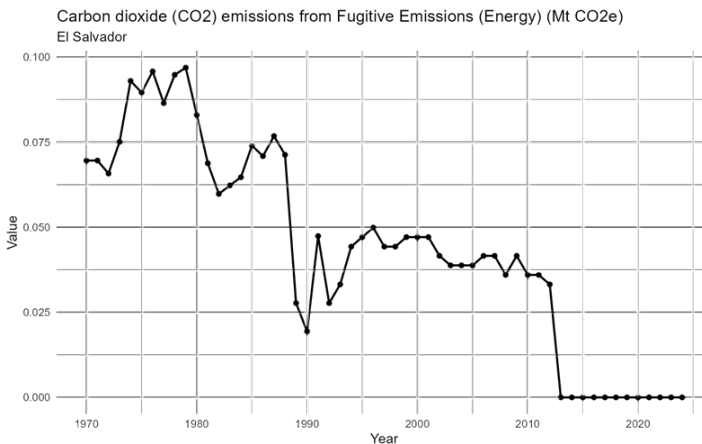
Tendencia moderada creciente vinculada al aumento del parque vehicular y la expansión del consumo energético de la clase media urbana.

Figura 31. Emisiones de la agricultura (Mt CO₂e)

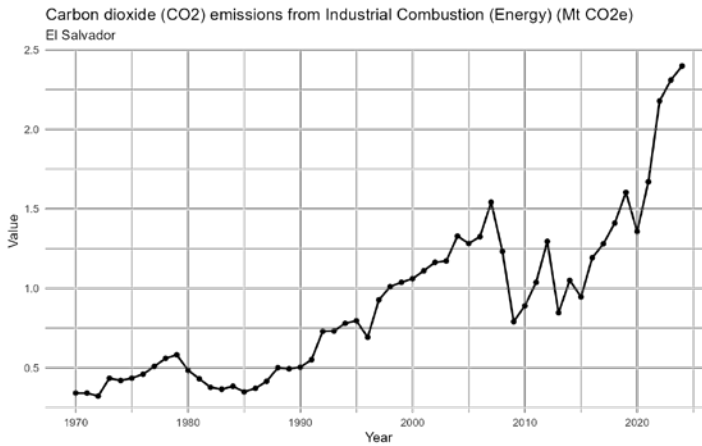
La estabilidad relativa refleja la constancia de la estructura agroproductiva; las emisiones agrícolas mantienen una contribución constante al total nacional.

Figura 32. Emisiones de energía en edificios (Mt CO₂e)

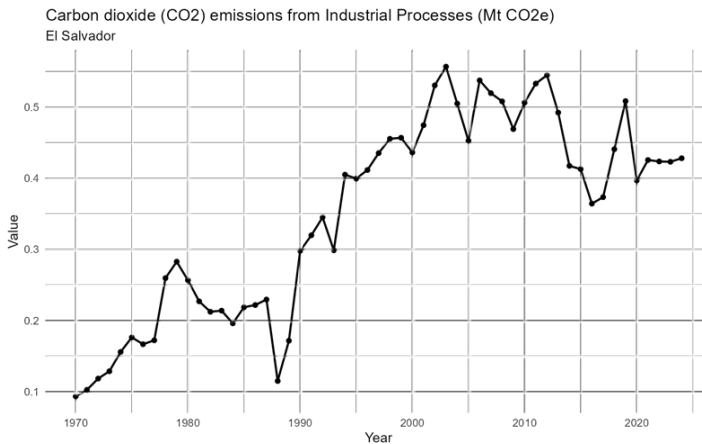
La tendencia creciente en años recientes refleja la expansión urbana y el mayor consumo eléctrico residencial y comercial.

Figura 33. Emisiones fugitivas del sector energía

Niveles históricamente bajos que confirman que este subsector no representa una fuente de presión significativa en el perfil nacional.

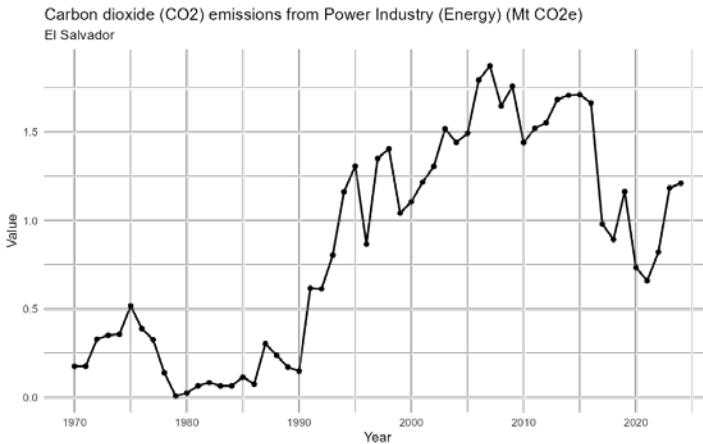
Figura 34. Emisiones de combustión industrial en el sector energía

Crecimiento progresivo desde 1990, más claro después del año 2000, reflejando la industrialización gradual de la economía.

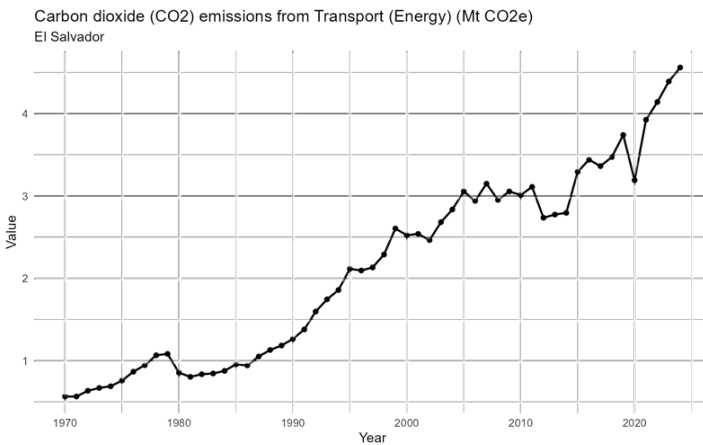
Figura 35. Emisiones de procesos industriales

La tendencia ascendente sugiere expansión en sectores como cemento y manufactura, cuyas emisiones provienen de transformaciones químicas, no solo de combustión.

Figura 36. Emisiones de la industria eléctrica



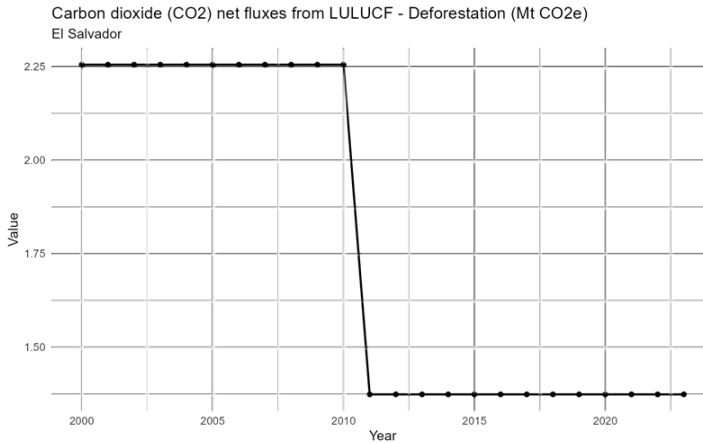
Los picos entre 2005 y 2015 reflejan la mayor dependencia de generación térmica en períodos de baja disponibilidad hidroeléctrica, evidenciando la sensibilidad del sistema ante la variabilidad climática.

Figura 37. Emisiones del sector transporte (Mt CO₂e)

La tendencia claramente ascendente identifica al transporte como el sector de mayor crecimiento de presión climática y la principal brecha pendiente de la transición energética para el cumplimiento de las metas.

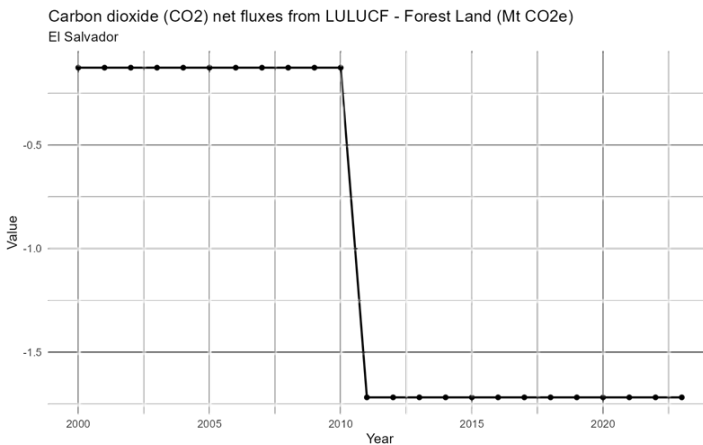
5.5.2 Emisiones LULUCF

Figura 38. Emisiones por deforestación (LULUCF)



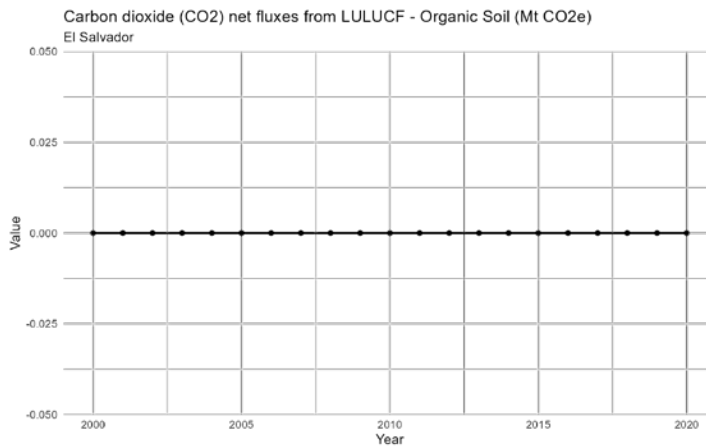
Los valores positivos confirman que la deforestación ha operado históricamente como fuente neta de carbono; la tendencia reciente decreciente es coherente con la desaceleración de la pérdida forestal.

Figura 39. Tierras forestales: dinámica sumidero/fuente



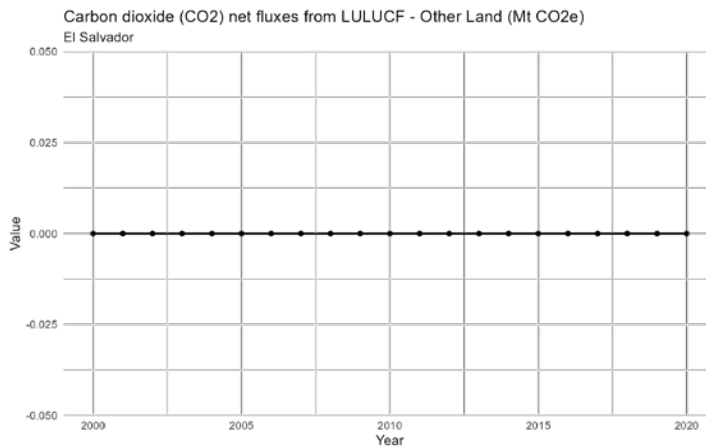
La alternancia entre períodos de absorción y emisión neta refleja la interacción entre regeneración natural y presión antrópica sobre los bosques.

Figura 40. Emisiones vinculadas a suelos orgánicos

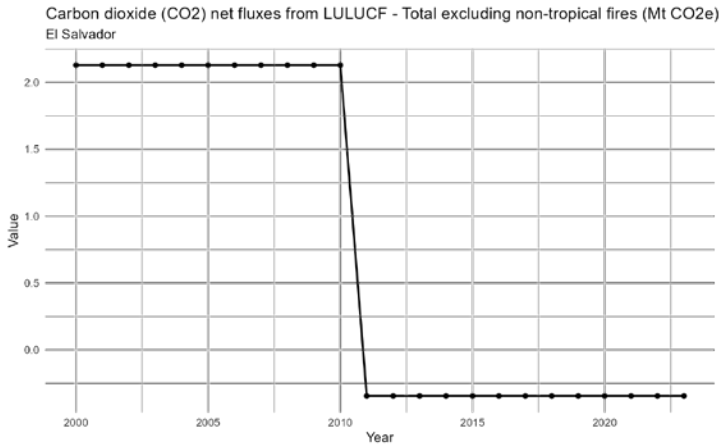


Los valores marginales confirman la contribución secundaria de este componente al inventario nacional.

Figura 41. Componente 'otras tierras' del LULUCF

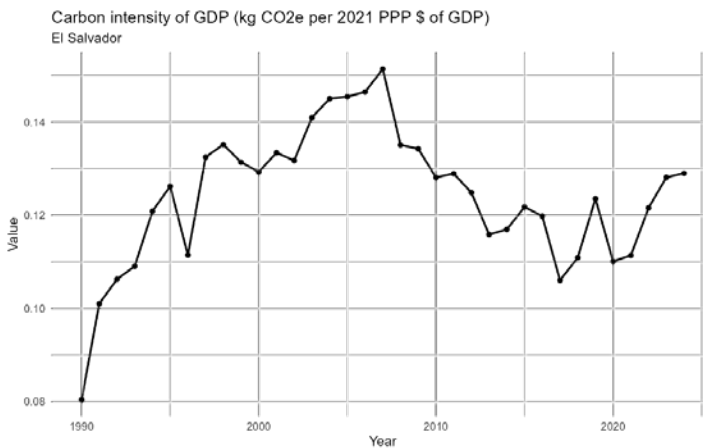


Contribución reducida y sin tendencias estructurales marcadas.

Figura 42. Total de emisiones netas LULUCF excluyendo incendios no tropicales

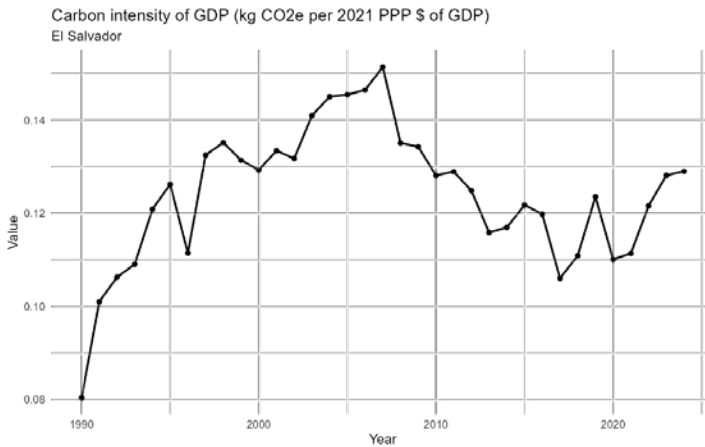
El comportamiento oscilante entre emisiones y absorciones netas revela la fragilidad del balance de carbono forestal, cuya dirección futura depende de los programas de restauración comprometidos en la NDC.

5.5.3 Intensidad de carbono y gases fluorados

Figura 43. Intensidad de carbono del PIB (PPA 2021)

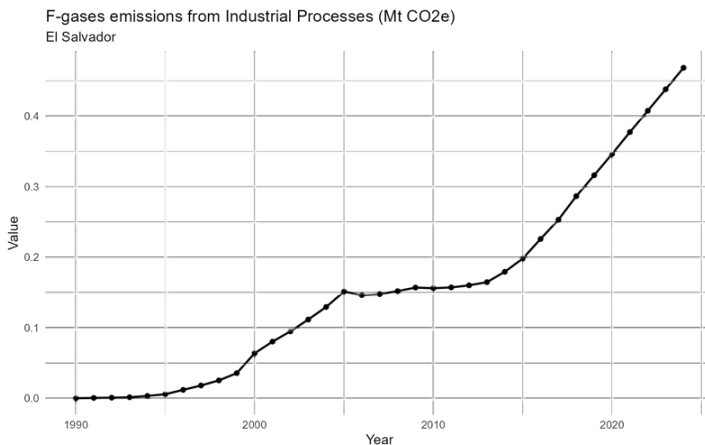
La reducción progresiva desde 1990 indica mejoras en eficiencia económica relativa, coherente con la expansión de renovables y la transición sectorial hacia servicios.

Figura 44. Intensidad de carbono del PIB (dólares constantes 2015)

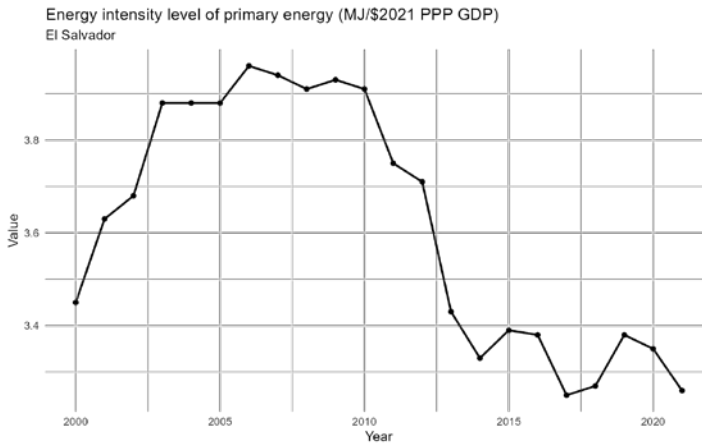


La consistencia en ambas métricas confirma la tendencia real de desacoplamiento relativo, aunque el desacoplamiento absoluto aún no se ha verificado.

Figura 45. Emisiones de gases fluorados de procesos industriales

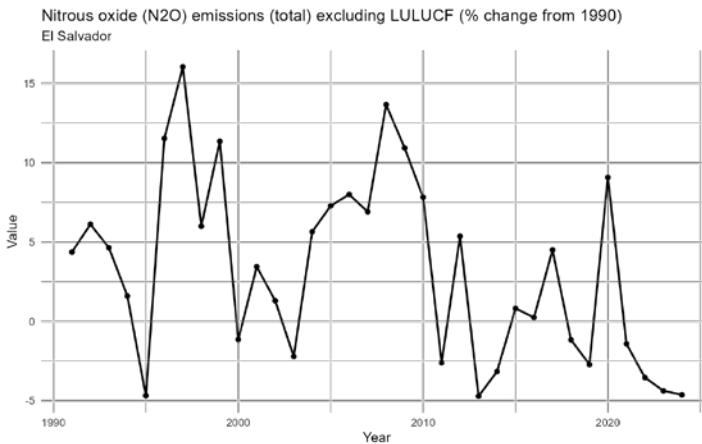


Niveles bajos con ligera tendencia creciente reciente, asociados al uso creciente de sistemas de refrigeración y climatización en el contexto de urbanización.

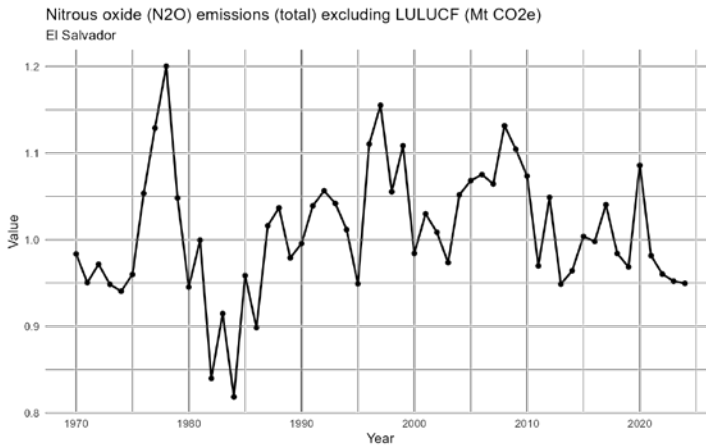
Figura 46. Intensidad energética de la economía

La tendencia descendente confirma mejoras en la eficiencia de uso de energía por unidad de producción, coherente con los cambios en la composición sectorial del PIB.

5.5.4 Emisiones de óxido nítrico

Figura 47. Emisiones de N₂O desde 1990 (% de cambio)

Las fluctuaciones reflejan la variabilidad en las actividades agropecuarias como principal fuente nacional: manejo de suelos agrícolas con fertilizantes y gestión del estiércol.

Figura 48. Emisiones totales de N₂O excluyendo LULUCF (Mt CO₂e)

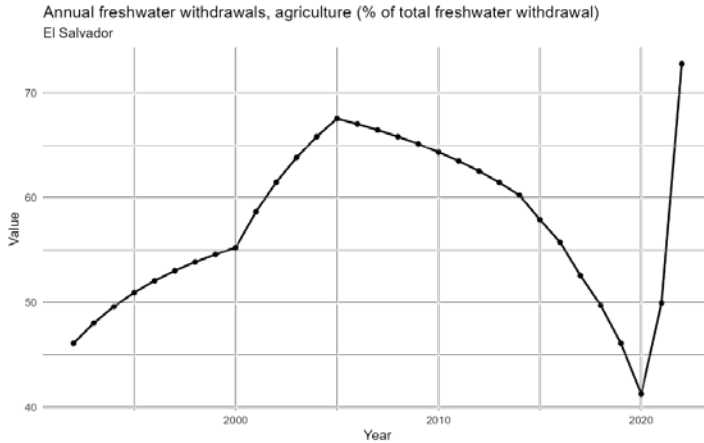
La estabilidad relativa no indica ausencia de presión, sino la constancia de la actividad agropecuaria como fuente de este GEI de elevado potencial de calentamiento.

5.6 Recursos hídricos, presión extractiva y capital natural ajustado

El bloque hídrico y de capital natural integra indicadores de Presión—P, extracción y estrés hídrico— con indicadores de Estado—E, disponibilidad renovable— y con los indicadores de ahorro ajustado, que incorporan el costo económico de la degradación al cálculo del ahorro efectivo de la economía. Los resultados confirman el estrés hídrico estructural del capítulo introductorio y revelan, a través del ahorro genuino, que la aparente prosperidad económica incluye costos ambientales invisibilizados en las cuentas nacionales convencionales.

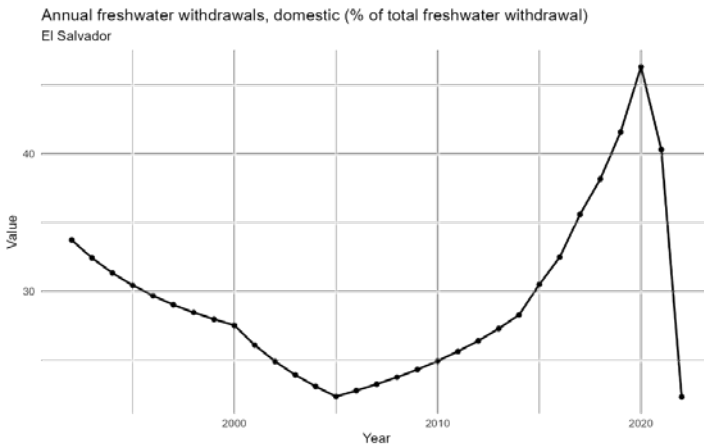
5.6.1 Extracción de agua dulce y estrés hídrico

Figura 49. Extracciones de agua dulce en la agricultura (% del total)



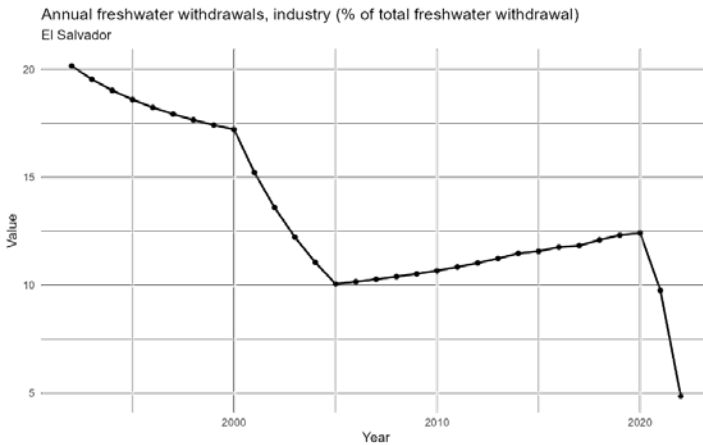
La concentración histórica del uso agrícola, que en varios períodos supera el 50 % de la extracción total, genera la principal presión sectorial sobre los recursos renovables.

Figura 50. Extracciones de agua dulce para uso doméstico (% del total)



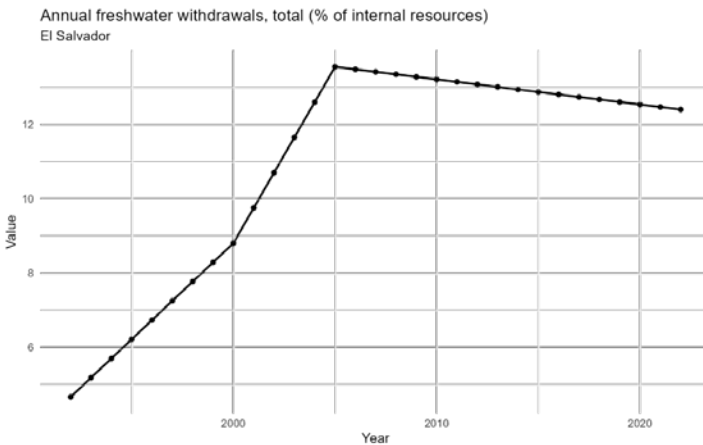
La participación doméstica, con tendencia levemente creciente vinculada a urbanización y crecimiento demográfico, representa la presión más directamente relacionada con el bienestar humano.

Figura 51. Extracciones de agua dulce en la industria (% del total).



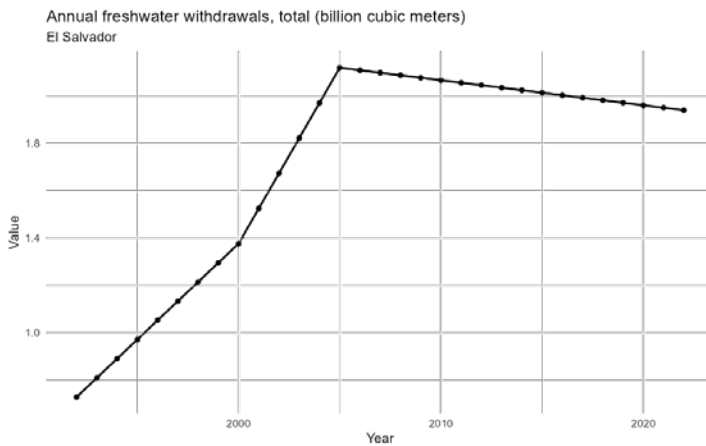
La participación industrial reducida y estable refleja la estructura productiva de baja intensidad hídrica industrial, aunque su monitoreo es relevante ante expansión manufacturera.

Figura 52. Extracciones totales como porcentaje de recursos internos renovables



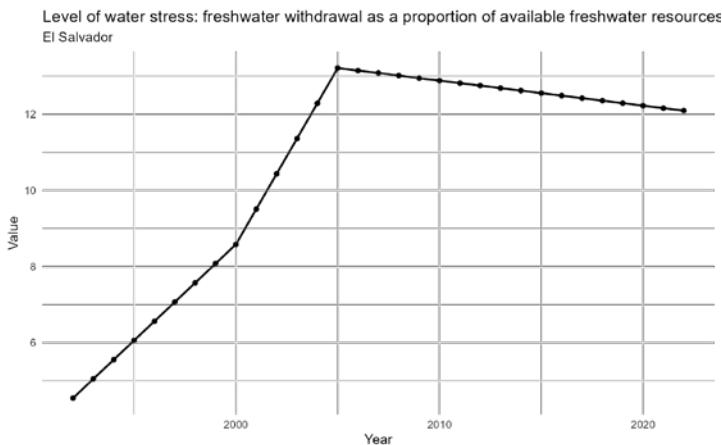
Los valores elevados confirman el nivel de presión estructural, con picos en años de menor disponibilidad hídrica que evidencian la sensibilidad ante la variabilidad climática.

Figura 53. Extracciones totales en términos absolutos (miles de millones de m³)



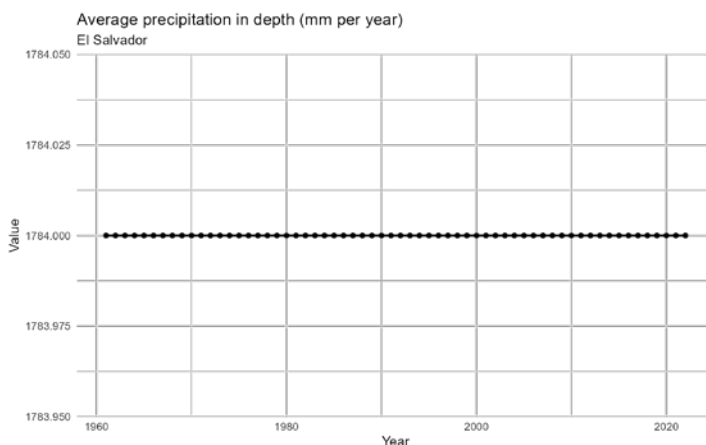
La ligera tendencia creciente, asociada al aumento poblacional y expansión agrícola, es coherente con la proyección de mayor presión bajo los escenarios del Capítulo III.

Figura 54. Nivel de estrés hídrico



Los valores elevados y persistentes confirman que El Salvador opera crónicamente en condiciones de estrés hídrico moderado a alto, con riesgo de transición hacia estrés severo en años de sequía del Corredor Seco.

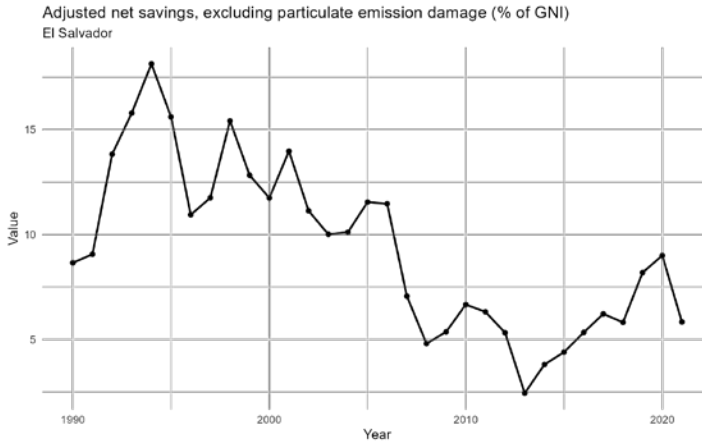
Figura 55. Precipitación promedio anual (mm/año)



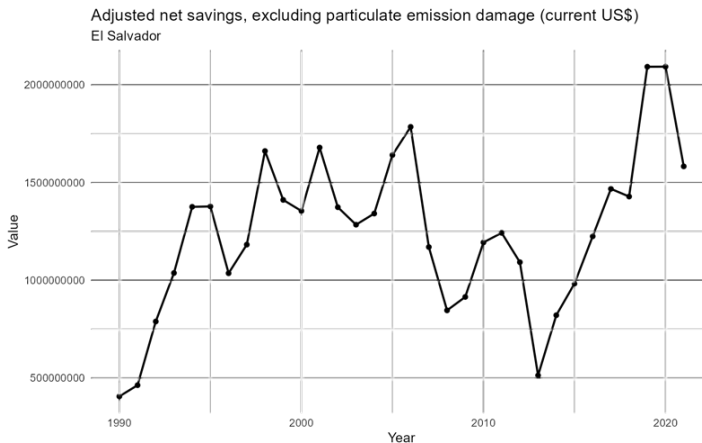
La virtual constancia del indicador indica ausencia de cambios en el promedio anual; los impactos del cambio climático sobre el agua se manifiestan en la distribución temporal y espacial de las lluvias, no necesariamente en el promedio.

5.6.2 Capital natural ajustado y ahorro genuino

Los indicadores de ahorro ajustado (metodología de capital natural del BM) traducen el costo de la degradación ambiental a términos económicos comparables con el PIB. Su lectura conjunta revela que, cuando se descuentan del ingreso nacional el costo de la contaminación atmosférica, el agotamiento forestal y el daño por CO₂, la capacidad real de acumulación de riqueza de la economía salvadoreña es menor de lo que indican las cuentas convencionales.

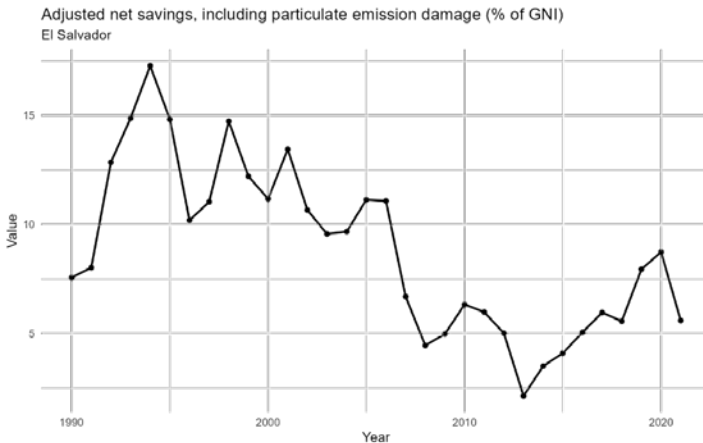
Figura 56. Ahorro neto ajustado excluyendo daño por partículas (% del INB)

Las fluctuaciones reflejan la sensibilidad del ahorro ajustado a los ciclos económicos y a la evolución de precios internacionales.

Figura 57. Ahorro neto ajustado excluyendo daño por partículas (US\$ actuales)

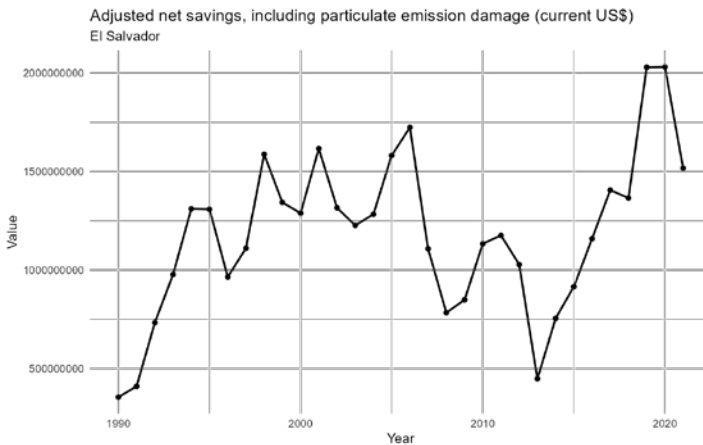
El crecimiento nominal de largo plazo refleja la expansión de la economía.

Figura 58. Ahorro neto ajustado, incluyendo daño por partículas (% del INB)

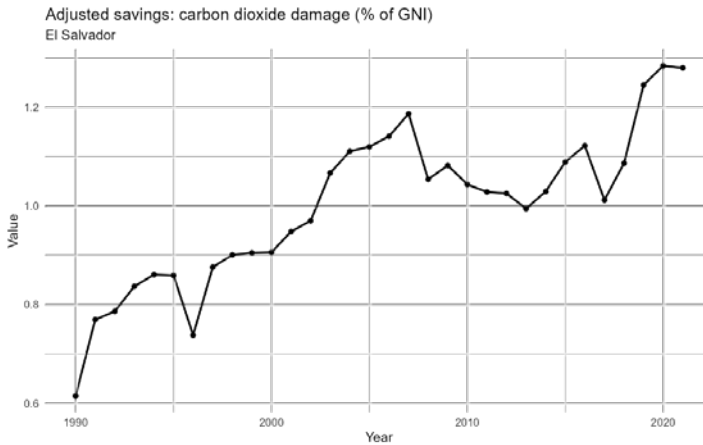


La reducción respecto al indicador excluyente cuantifica el costo económico de la contaminación atmosférica, con años donde el valor se acerca a cero.

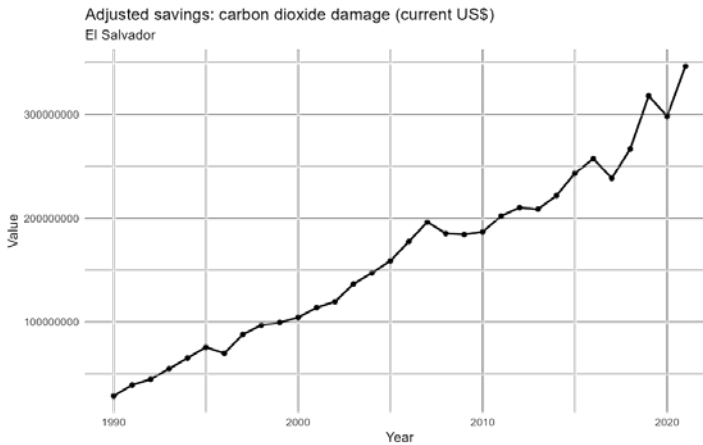
Figura 59. Ahorro neto ajustado incluyendo daño por partículas (US\$ actuales)



La brecha entre indicadores cuantifica en términos monetarios el costo de la contaminación incorporado al ahorro genuino.

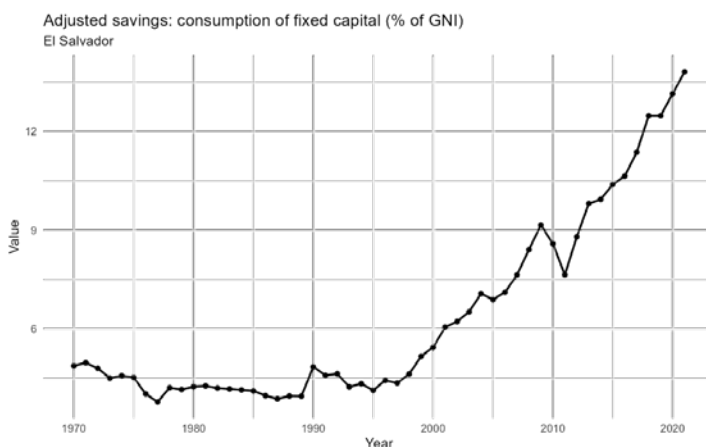
Figura 60. Ahorro ajustado por daño por CO₂ (% del INB)

El impacto del costo social del carbono sobre la renta nacional señala la deuda climática acumulada: una fracción del ingreso que, desde la perspectiva de sostenibilidad, debería destinarse a compensar los daños generados.

Figura 61. Ahorro ajustado por daño por CO₂ (US\$ actuales)

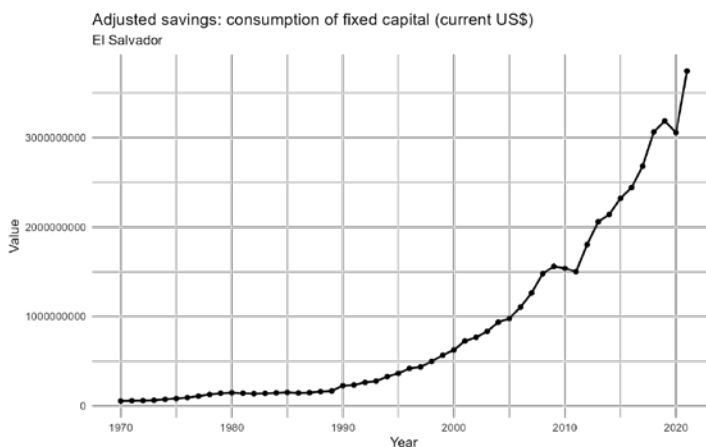
Tendencia creciente coherente con el incremento global del valor monetario del carbono y el aumento de emisiones del sector energía.

Figura 62. Ahorro ajustado por consumo de capital fijo (% del INB)



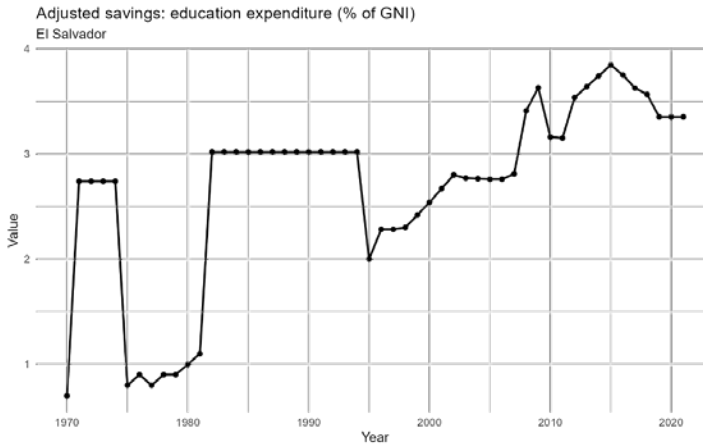
La estabilidad relativa indica una proporción constante del ingreso destinada a compensar la depreciación del capital físico, característica de economías en desarrollo con tasas moderadas de inversión bruta.

Figura 63. Ahorro ajustado por consumo de capital fijo (US\$ actuales)



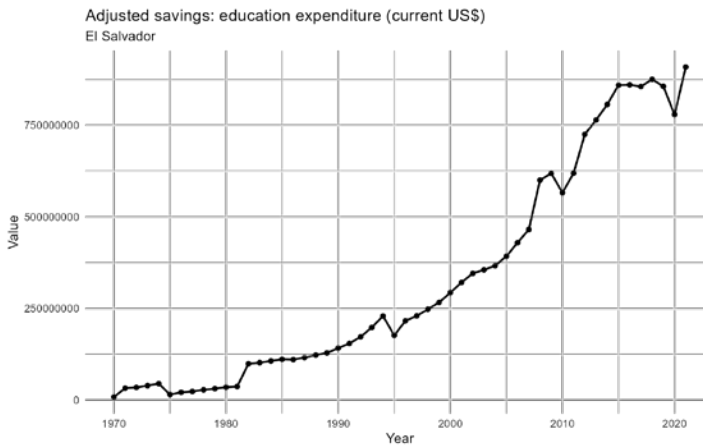
El incremento nominal es consistente con el crecimiento de la economía y la mayor base de capital instalado.

Figura 64. Ahorro ajustado por gasto en educación (% del INB)

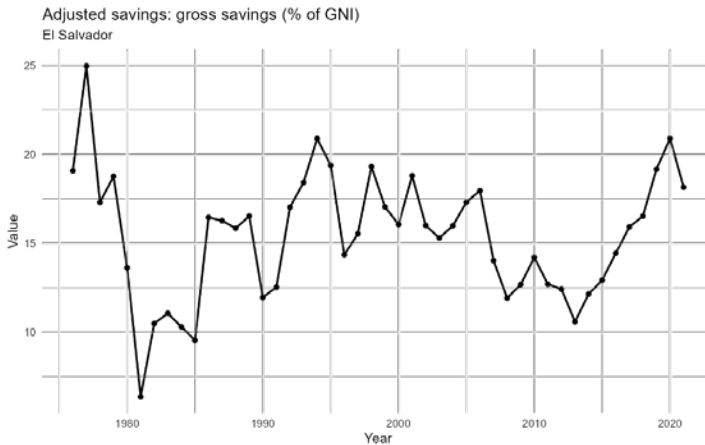


La tendencia moderadamente creciente refleja mayor inversión en capital humano, componente que las cuentas de ahorro ajustado incorporan como acumulación de riqueza intangible.

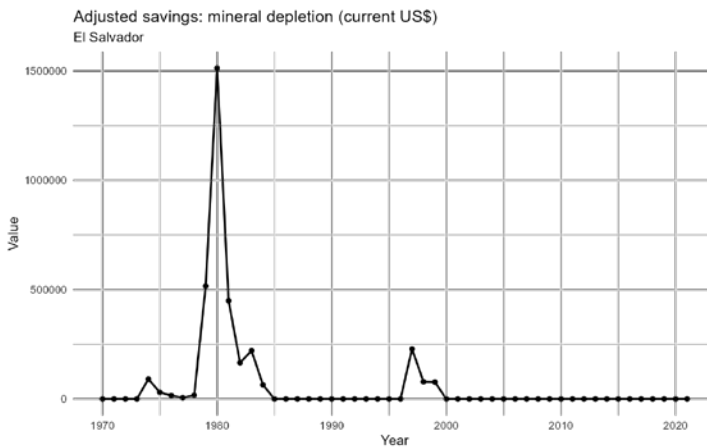
Figura 65. Ahorro ajustado por gasto en educación (US\$ actuales)



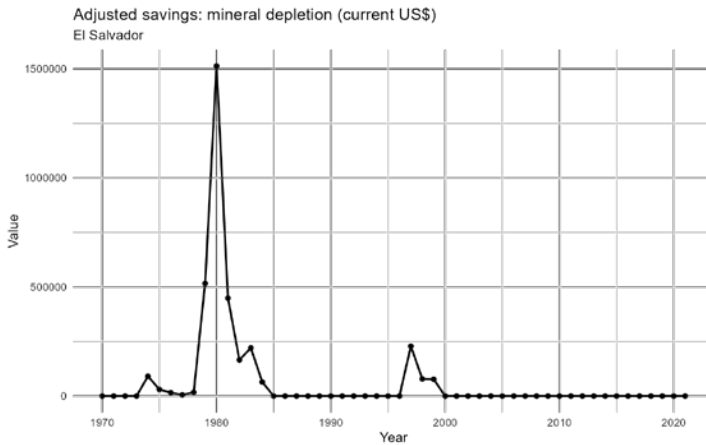
El crecimiento nominal desde los años 2000 señala expansión presupuestaria cuya efectividad en capital humano acumulado requiere indicadores de calidad complementarios.

Figura 66. Ahorro ajustado a partir del ahorro bruto (% del INB)

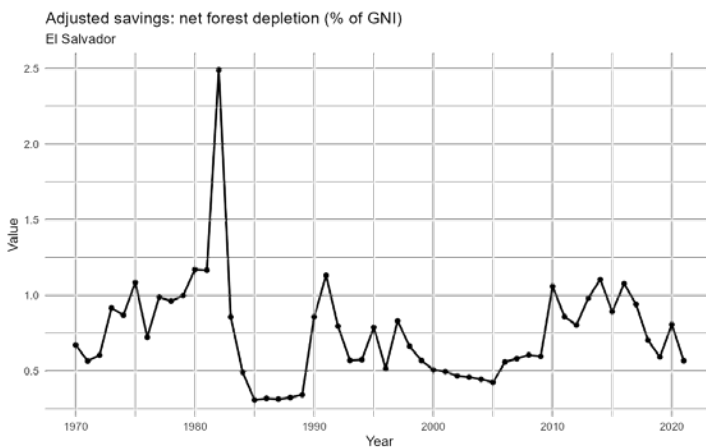
Fluctuaciones con estabilidad estructural de largo plazo que reflejan la capacidad de ahorro de la economía antes del ajuste por degradación ambiental.

Figura 67. Ahorro ajustado por agotamiento de minerales (% del INB)

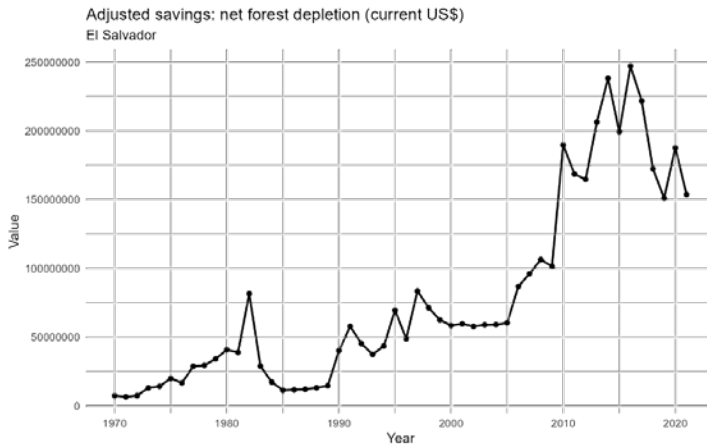
Los valores cercanos a cero confirman la baja dependencia de los recursos mineros, diferenciando a El Salvador de los países extractivistas de la región.

Figura 68. Ahorro ajustado por agotamiento de minerales (US\$ actuales)

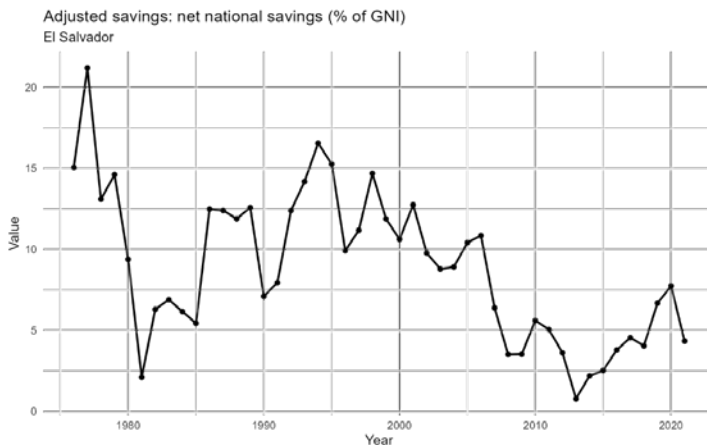
La variabilidad leve y los valores reducidos confirman el carácter marginal de la minería en la estructura económica nacional.

Figura 69. Ahorro ajustado por agotamiento neto forestal (% del INB)

Los valores positivos con variabilidad interanual reflejan el costo económico de la extracción forestal descontado del ahorro nacional.

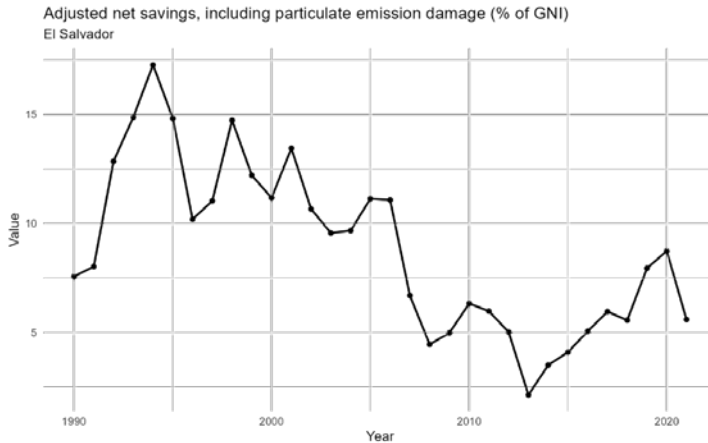
Figura 70. Ahorro ajustado por agotamiento neto forestal (US\$ actuales)

El incremento gradual en algunos períodos es coherente con la mayor valorización económica del recurso forestal.

Figura 71. Ahorro ajustado a partir del ahorro nacional neto (% del INB)

Las variaciones significativas y descensos marcados revelan la fragilidad del ahorro genuino ante crisis económicas y choques ambientales.

Figura 72. Ahorro ajustado por daño por emisiones de partículas (% del INB)



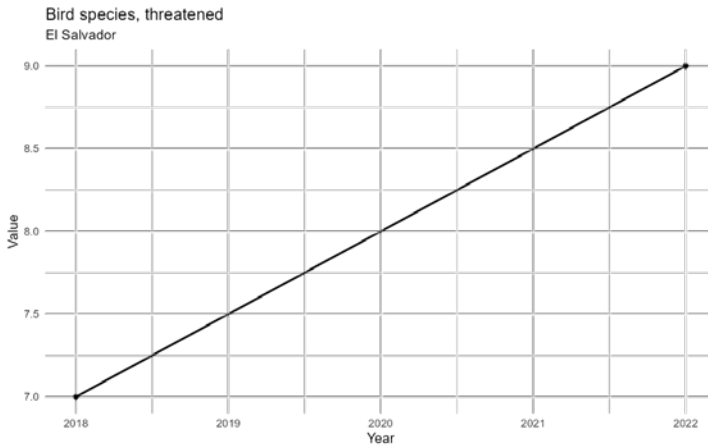
Los niveles bajos pero constantes cuantifican el costo ambiental de la contaminación atmosférica en la contabilidad nacional ajustada.

5.7 Biodiversidad, ecosistemas y capital natural

El bloque de biodiversidad integra indicadores del componente de Estado (E) que complementan los análisis de cobertura forestal con información sobre la condición de las poblaciones de especies y los ecosistemas acuáticos. Los resultados revelan la dimensión más preocupante del perfil ambiental: mientras los indicadores de servicios básicos y energía muestran tendencias positivas robustas, los indicadores de biodiversidad exhiben tendencias negativas que reflejan el deterioro acumulado de los ecosistemas. La pérdida de biodiversidad representa una degradación de la capacidad funcional y resiliencia ecosistémica que no puede compensarse con avances en los indicadores de servicios básicos: genera umbrales de irreversibilidad propios del concepto de capital natural crítico del Capítulo II.

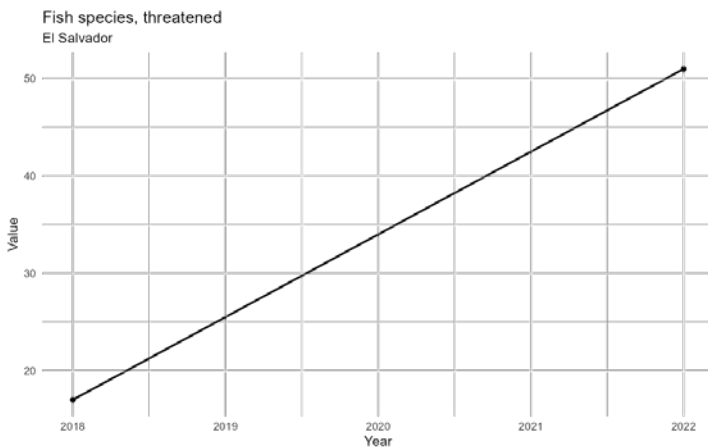
5.7.1 Especies amenazadas

Figura 73. Especies de aves amenazadas (número)



La tendencia creciente, progresiva y acumulativa indica deterioro continuo de las condiciones de conservación. Las aves son indicadores sensibles del estado ecosistémico: su disminución refleja pérdida de hábitat, fragmentación del paisaje y reducción de la conectividad ecosistémica documentada en IV.4.

Figura 74. Número de especies de peces amenazadas



La tendencia creciente evidencia la presión sostenida sobre los ecosistemas acuáticos, resultante de la convergencia de tres factores de presión: contaminación hídrica (IV.2), extracción excesiva (IV.6) y degradación de hábitats riparios por pérdida forestal (IV.4).

5.8 El ISSA: Construcción, trayectoria y proyección

El ISSA constituye el instrumento de síntesis más comprehensivo del presente análisis: una métrica única en escala 0–1 que integra empíricamente las cinco dimensiones del modelo FMPEIR en un valor de desempeño ambiental sistémico nacional. Su construcción responde al mandato metodológico establecido en el Capítulo III (sección 3.6) de producir un indicador integrador que supere las limitaciones del análisis sectorial aislado, permitiendo evaluar la sostenibilidad ambiental como propiedad emergente del sistema en su conjunto y no como suma de sus partes. La utilidad del ISSA es triple: diagnóstica, al revelar el nivel de sostenibilidad sistémica en un momento dado; dinámica, al rastrear la trayectoria del sistema a lo largo del tiempo; y prospectiva, al proyectar la evolución probable bajo el escenario tendencial vigente.

5.8.1 Metodología de construcción del ISSA

El ISSA se construyó en cuatro etapas secuenciales. La primera etapa consistió en la selección de indicadores representativos para cada dimensión del FMPEIR, priorizando aquellos con series temporales completas, cobertura del período 2000–2023 y validación estadística confirmada en los análisis sectoriales precedentes (IV.2 a IV.7). La segunda etapa aplicó normalización min-max en escala 0–1 para cada indicador, garantizando la comparabilidad entre variables de unidades radicalmente distintas, como porcentajes, toneladas de CO₂, metros cúbicos de agua o número de especies; y asignando la dirección de la normalización en función del sentido ambiental del indicador: una cobertura de saneamiento creciente se normaliza en dirección positiva (mayor es mejor), mientras que una tendencia creciente en emisiones o en número de especies amenazadas se normaliza en dirección negativa (mayor es peor). La tercera etapa calculó el puntaje dimensional como promedio ponderado de los indicadores normalizados dentro de cada dimensión FMPEIR, y la cuarta etapa obtuvo el ISSA como promedio no ponderado de los cinco puntajes dimensionales, decisión metodológica con-

servadora que evita introducir ponderaciones subjetivas en ausencia de consenso empírico sobre la importancia relativa de cada dimensión.

Para la proyección del ISSA al período 2024–2050, se ajustó un modelo logístico acotado (logit) sobre la serie histórica 2000–2023, que garantiza que el índice permanezca dentro del rango $[0, 1]$ y captura el patrón de rendimientos decrecientes característico de los procesos de mejora con techo estructural: la tasa de mejora tiende a desacelerarse a medida que el sistema se aproxima al umbral superior de sostenibilidad, reflejando la mayor dificultad de los avances finales en comparación con los iniciales. Las bandas de confianza al 95 % ofrecen la información de incertidumbre necesaria para interpretar los hitos proyectados como rangos probables y no como predicciones puntuales.

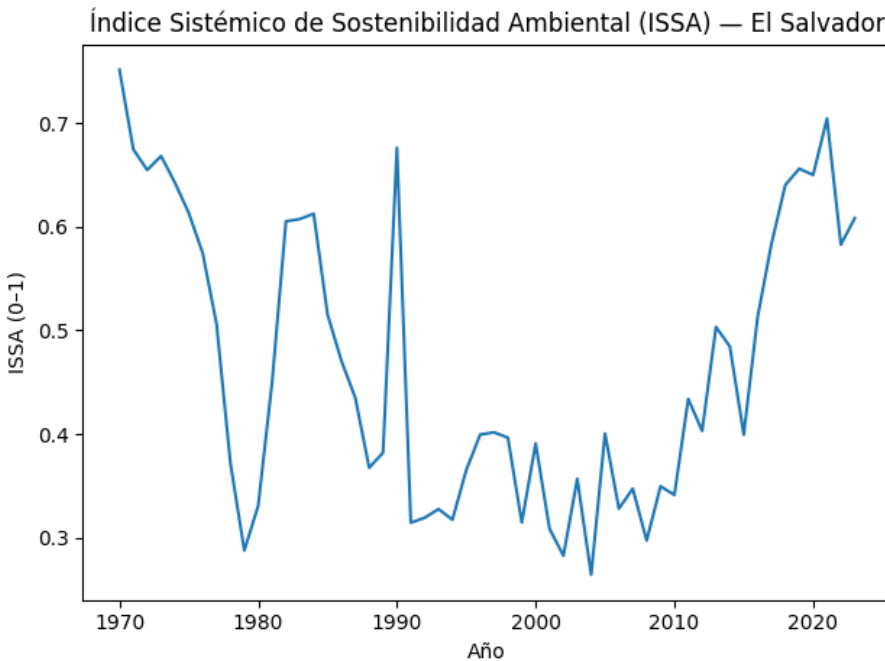
5.8.2 Trayectoria histórica del índice

La serie histórica larga del ISSA, construida para el período 1970–2024 con los indicadores disponibles, revela una trayectoria que documenta con precisión cuantitativa las grandes transformaciones socioambientales de El Salvador en las últimas cinco décadas. El índice alcanzaba valores relativamente elevados (en torno a 0.70–0.75) en la década de los años setenta, período caracterizado por una menor presión demográfica, menor urbanización e intensidad de las actividades productivas que posteriormente generarían las principales presiones ambientales. La caída abrupta del ISSA durante los años ochenta (con el índice descendiendo hasta valores próximos a 0.30) coincide con el período del conflicto armado (1979–1992), que tuvo consecuencias documentadas sobre los ecosistemas forestales, la infraestructura de saneamiento, el capital institucional de gestión ambiental y la acumulación de pasivos ambientales que condicionaron el punto de partida de la recuperación postconflicto.

El período 1990–2003 exhibe la mayor volatilidad de la serie, con fluctuaciones pronunciadas que reflejan la superposición de múltiples perturbaciones: los procesos de reconstrucción postconflicto, los ajustes estructurales económicos de los años noventa, el impacto del huracán Mitch (1998) y de los terremotos de 2001, y los primeros esfuerzos de

institucionalización ambiental articulados en torno a la Ley de Medio Ambiente de 1998. El período 2003–2012 muestra una estabilización relativa del ISSA en valores de 0.35–0.50, con oscilaciones moderadas y una tendencia levemente ascendente que refleja los primeros efectos acumulativos de las inversiones en infraestructura de saneamiento y el inicio de la expansión de la cobertura de servicios básicos. La recuperación más sostenida y pronunciada se produce a partir de 2012, con el ISSA escalando desde aproximadamente 0.40 hasta 0.70 en 2022, dinámica impulsada por la convergencia de los avances en todas las dimensiones socio-sanitarias documentados en los capítulos precedentes y por la aceleración de la transición renovable en la matriz eléctrica.

Figura 75. Serie histórica del ISSA de El Salvador, 1970–2024 (escala 0–1)



La trayectoria documenta cinco fases diferenciadas: valores relativamente altos en la década de 1970 (0.70–0.75), colapso pronunciado durante el conflicto armado (mínimo ≈ 0.29 en 1979), volatilidad elevada en el período de posconflicto y ajuste estructural (1990–2003), estabilización gradual (2003–2012) y recuperación sostenida acelerada (2012–2024). El valor de 2024 (0.60) se ubica en una trayectoria de recuperación que aún no ha recuperado el nivel histórico de la década de 1970.

5.8.3 Puntajes por dimensión FMPEIR: Análisis de la estructura interna del ISSA

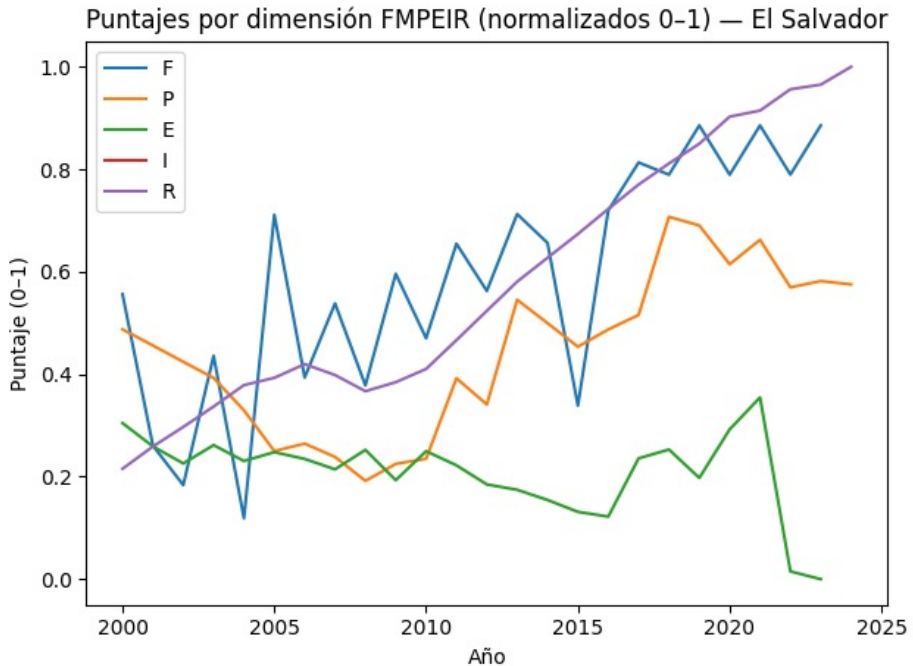
El análisis de los puntajes dimensionales normalizados para el período 2000–2024 revela la estructura interna del ISSA y permite identificar qué dimensiones del modelo FMPEIR están impulsando la mejora del índice agregado y cuáles representan las principales brechas sistémicas. Los resultados confirman y cuantifican con mayor precisión el diagnóstico cualitativo de los capítulos precedentes: las dimensiones de Fuerzas Motrices (F) y Respuesta (R) exhiben las trayectorias más ascendentes del período, la dimensión de Presión (P) muestra una evolución moderada con alta volatilidad, y las dimensiones de Estado (E) e Impactos (I) presentan los puntajes más bajos y las trayectorias más preocupantes del conjunto.

La dimensión de Respuesta (R) alcanza el puntaje más alto en 2023 (≈ 1.0), reflejando que los avances en cobertura de servicios básicos, saneamiento, agua potable, combustibles limpios, acceso a electricidad, han llevado estos indicadores a sus valores más altos de la serie. Esta posición en el techo de la escala normalizada es coherente con el efecto techo estadístico documentado en IV.9: los indicadores de servicios básicos se aproximan al 100 % de cobertura, lo que comprime su varianza y reduce su capacidad de mejorar ulteriormente, transfiriendo la palanca del ISSA hacia dimensiones que aún tienen mayor recorrido de mejora. La dimensión de Fuerzas Motrices (F) muestra alta volatilidad interanual (con oscilaciones pronunciadas entre 2000 y 2015 que reflejan la sensibilidad de los indicadores de estructura económica y demográ-

fica ante ciclos económicos) y una tendencia ascendente clara a partir de 2015, con puntajes que alcanzan valores de 0.80–0.90 en los últimos años de la serie. La dimensión de Presiones (P), con puntajes que oscilan entre 0.20 y 0.70 a lo largo del período y alcanzan aproximadamente 0.60 en 2023, refleja la dualidad del perfil de presiones documentada en IV.5 e IV.6: reducciones en la intensidad de carbono y en la presión relativa del LULUCF, pero crecimiento persistente en las emisiones absolutas del sector transporte y en la extracción hídrica.

Las dimensiones de Estado (E) e Impactos (I) representan las brechas más críticas del ISSA. La dimensión E, que integra el estado de los ecosistemas forestales, la calidad hídrica, la biodiversidad y la disponibilidad de recursos naturales, exhibe los puntajes más bajos y la trayectoria más inestable del conjunto, con valores que oscilan entre 0.10 y 0.35 a lo largo del período y alcanzan niveles próximos a cero en los años más recientes. Esta posición diagnóstica es coherente con los hallazgos de IV.4 (pérdida forestal sostenida), IV.6 (estrés hídrico estructural) e IV.7 (tendencia creciente en especies amenazadas): el componente de Estado biofísico es el talón de Aquiles del sistema ambiental salvadoreño, el componente cuyo deterioro acumulado amenaza con erosionar la base material sobre la que descansan todos los demás avances. La dimensión I, que integra los impactos sobre la salud humana, la economía y los servicios ecosistémicos, muestra una trayectoria de mejora, pero todavía con puntajes bajos, consistente con la reducción documentada en la mortalidad ambiental (IV.2) y con la persistencia de impactos estructurales por degradación ecosistémica que aún no se han revertido.

Figura 76. Puntajes por dimensión FMPEIR normalizados (0-1) para El Salvador, 2000-2024

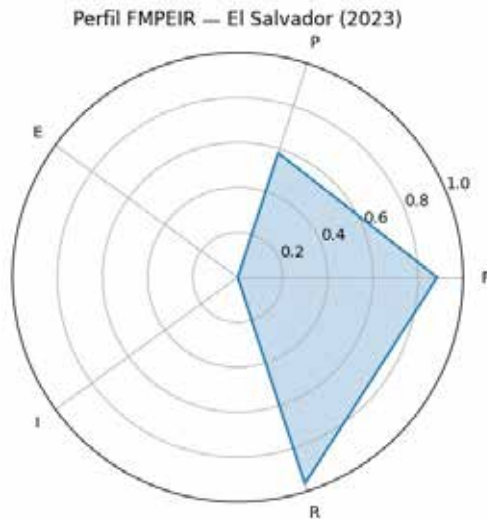


La dimensión de Respuesta (R, línea morada) alcanza el puntaje más alto en 2023 (≈ 1.0), reflejando la casi universalización de los servicios básicos. Las Fuerzas Motrices (F, línea azul) muestran alta volatilidad con tendencia ascendente reciente. Las Presiones (P, línea naranja) exhiben mejora moderada (≈ 0.60 en 2023). El Estado (E, línea verde) y los Impactos (I, línea roja) presentan los puntajes más bajos, con la dimensión E en valores próximos a cero en los últimos años, cuantificando el deterioro acumulado de los ecosistemas y el capital natural.

5.8.4 Perfil FMPEIR 2023: Radiografía del sistema ambiental

El perfil radar del FMPEIR para el año 2023 ofrece la representación más sintética y diagnósticamente poderosa del estado actual del sistema ambiental salvadoreño. La geometría del polígono FMPEIR en 2023 es característica de un sistema en transición asimétrica: altamente desarrollado en la dimensión de Respuestas institucionales y de servicios básicos, con avances significativos en la dimensión de Fuerzas Motrices, pero con brechas críticas y estructurales en las dimensiones de Estado ecosistémico e Impactos sobre el capital natural. La asimetría del polígono no es solo una descripción estática del estado actual: es una representación geométrica de la tensión sistémica central que define el futuro ambiental de El Salvador. Un sistema que ha invertido masivamente en la dimensión de Respuesta ($R \approx 1.0$) sin haber revertido el deterioro del componente de Estado ($E \approx 0$) está construyendo sus avances sobre una base ecosistémica que se degrada, lo que genera una vulnerabilidad estructural de largo plazo: los beneficios sanitarios y energéticos logrados dependen en última instancia de la disponibilidad de recursos naturales (agua, suelo, biodiversidad) cuya condición el índice diagnostica como crítica.

Figura 77. Perfil radar FMPEIR de El Salvador, 2023 (escala 0–1 por dimensión).



La geometría asimétrica del polígono cuantifica la estructura de brechas del sistema ambiental: las dimensiones de Respuesta ($R \approx 1.0$) y Fuerzas Motrices ($F \approx 0.85$) alcanzan los puntajes más elevados; las Presiones ($P \approx 0.60$) muestran avance moderado; mientras que Estado ($E \approx 0$) e Impactos ($I \approx 0$) registran los valores más críticos, revelando el deterioro acumulado del capital natural como la principal brecha sistémica no resuelta del perfil ambiental salvadoreño.

5.8.5 Proyección del ISSA 2024–2050: Escenario tendencial y horizontes de sostenibilidad

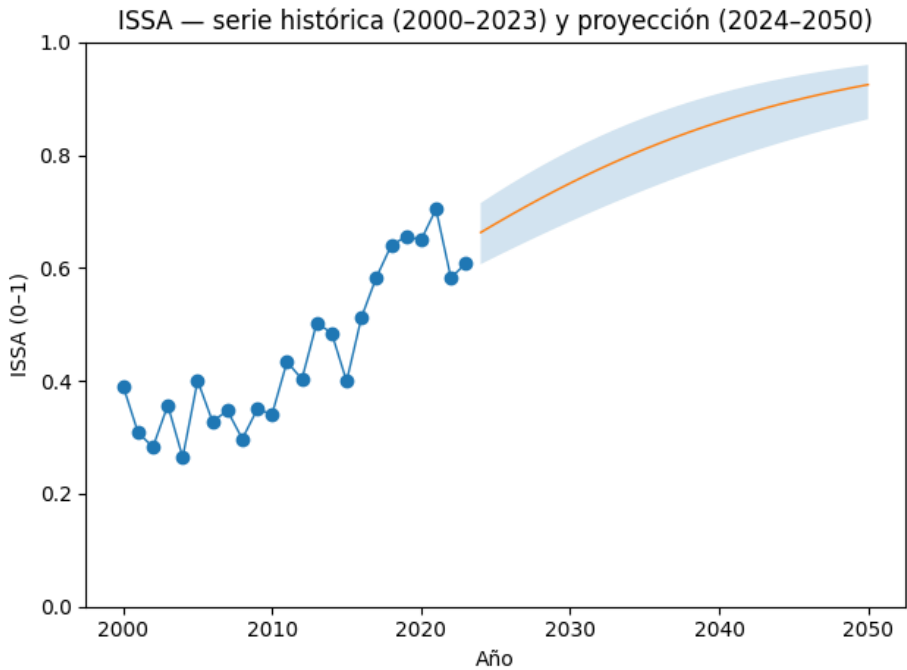
La proyección del ISSA al período 2024–2050 mediante el modelo logístico acotado arroja hitos cuantitativos que ofrecen una referencia prospectiva bajo el supuesto de continuidad de las tendencias observadas en el período 2000–2023. Para 2030, el modelo proyecta un ISSA de 0.750 (IC95%: 0.682 – 0.808); para 2040, un valor de 0.859 (IC95%: 0.787 – 0.909); y para 2050, un valor de 0.925 (IC95%: 0.864 – 0.960). La trayectoria proyectada es una curva logística que se aproxima gradualmente al techo de la escala normalizada, con rendimientos decrecientes que reflejan el supuesto de mayor dificultad de los avances finales: pasar de 0.60 a 0.75 en los primeros seis años es una mejora proporcional mayor que la que se produciría en los seis años siguientes.

Es fundamental interpretar esta proyección con la cautela epistemológica que requiere todo ejercicio prospectivo basado en la extrapolación de tendencias históricas. El modelo tendencial asume implícitamente que las condiciones estructurales que han impulsado la mejora del ISSA en el período reciente (inversión en infraestructura de servicios básicos, expansión de la generación eléctrica renovable, crecimiento económico sostenido) se mantendrán y que no ocurrirán perturbaciones disruptivas de gran magnitud. Ambos supuestos son cuestionables en el contexto de El Salvador: el país se encuentra entre los 20 más afectados del mundo por el riesgo climático (Germanwatch, 2023), y los escenarios del IPCC (2022) proyectan intensificación de las sequías, mayor frecuencia de eventos hidrometeorológicos extremos y reducción de la disponibili-

dad hídrica para América Central, todos factores que podrían degradar significativamente las dimensiones de Estado (E) e Impactos (I) del ISSA y desplazar la trayectoria proyectada hacia los límites inferiores de las bandas de confianza. La dimensión E del índice, que actualmente exhibe puntajes próximos a cero, es el componente con mayor capacidad de deterioro adicional y, por tanto, el que más probabilidad tiene de generar divergencias negativas respecto al escenario tendencial bajo condiciones de estrés climático intensificado.

La proyección tendencial debe leerse, por tanto, no como una predicción, sino como un escenario de referencia que define el horizonte de sostenibilidad alcanzable bajo el supuesto de continuidad de las políticas actuales: un ISSA de 0.75 en 2030 es posible si El Salvador mantiene el ritmo de inversión en servicios básicos y renovables, y un ISSA de 0.925 en 2050 es técnicamente alcanzable si las tendencias de las dimensiones R y F continúan su trayectoria y si las dimensiones E e I comienzan a recuperarse como resultado de los programas de restauración ecosistémica y descarbonización comprometidos en la NDC. Sin embargo, la probabilidad de alcanzar el extremo superior de la banda de confianza depende de que las intervenciones en el componente de Estado ecosistémico sean suficientes para contrarrestar la presión acumulada sobre los bosques, los cuerpos de agua y la biodiversidad: el talón de Aquiles del ISSA actual.

Figura 78. ISSA de El Salvador: serie histórica 2000–2023



Se muestra el ISSA de El Salvador, desde el periodo 2000–2023, representado con los puntos azules y la proyección tendencial 2024–2050, en la curva naranja, con bandas de confianza al 95 % (área sombreada), estimada mediante modelo logístico acotado. Los hitos proyectados son de 0.750 en 2030 (IC95%: 0.682–0.808), 0.859 en 2040 (IC95%: 0.787–0.909) y 0.925 en 2050 (IC95%: 0.864–0.960). La forma logística de la proyección captura el patrón de rendimientos decrecientes característico de los procesos de mejora con techo estructural: la tasa de avance se desacelera a medida que el índice se aproxima a 1.

5.9 Análisis multivariado de robustez e intensidad del cambio: Matriz de cuadrantes estratégica

Con el propósito de integrar en una perspectiva estadística unificada los hallazgos sectoriales presentados en las secciones IV.2 a IV.7, se aplicó un análisis multivariado de dos dimensiones que combina la robustez estadística (R^2) con la intensidad relativa del cambio (pendiente estandarizada mediante Z-score global) para el conjunto de los 89 indicadores evaluados en el período 2000–2024. Este análisis complementa el ranking unidimensional de significancia presentado en IV.1 con una clasificación bidimensional que permite distinguir entre transformaciones estructurales consolidadas, evoluciones graduales estables, dinámicas volátiles e incertidumbre estructural. La metodología se describe con precisión en el Capítulo III (sección 3.5.2), y los resultados aquí presentados constituyen la síntesis estadística global del capítulo de resultados.

5.9.1 Metodología del análisis de dispersión y matriz de cuadrantes

El análisis se construye sobre tres métricas calculadas para cada uno de los 89 indicadores: la pendiente del modelo de regresión lineal (slope), que cuantifica la dirección e intensidad del cambio; el coeficiente de determinación (R^2), que mide la proporción de la varianza temporal explicada por la tendencia lineal y opera como indicador de robustez estadística; y la pendiente estandarizada global (Z-score), que normaliza las pendientes de todos los indicadores a una escala comparable eliminando el efecto de las diferencias de unidades (porcentajes, toneladas, kWh, metros cúbicos) que harían inviable la comparación directa entre dimensiones tan heterogéneas como las emisiones de GEI, el acceso a saneamiento o los recursos hídricos per cápita.

La matriz de cuatro cuadrantes se construye posicionando cada indicador en el espacio definido por el eje horizontal (R^2 como medida de robustez, con línea divisoria en $R^2 = 0.50$) y el eje vertical (pendiente estandarizada Z como medida de intensidad, con línea divisoria en $Z = 0$).

Esta construcción genera cuatro categorías analíticas mutuamente excluyentes: Cuadrante I (alta intensidad y alta robustez), que agrupa las transformaciones estructurales más consolidadas; Cuadrante II (alta intensidad y baja robustez), que identifica cambios intensos pero estadísticamente inestables; Cuadrante III (baja intensidad y baja robustez), que señala las áreas de mayor vulnerabilidad e incertidumbre estructural; y Cuadrante IV (baja intensidad y alta robustez), que representa la evolución incremental y gradualmente estable. La aplicación de Z-scores sectoriales complementa este análisis global al identificar los motores de cambio específicos dentro de cada subsistema ambiental, superando las distorsiones que generaría la comparación directa de valores absolutos entre sectores con escalas de medición radicalmente distintas.

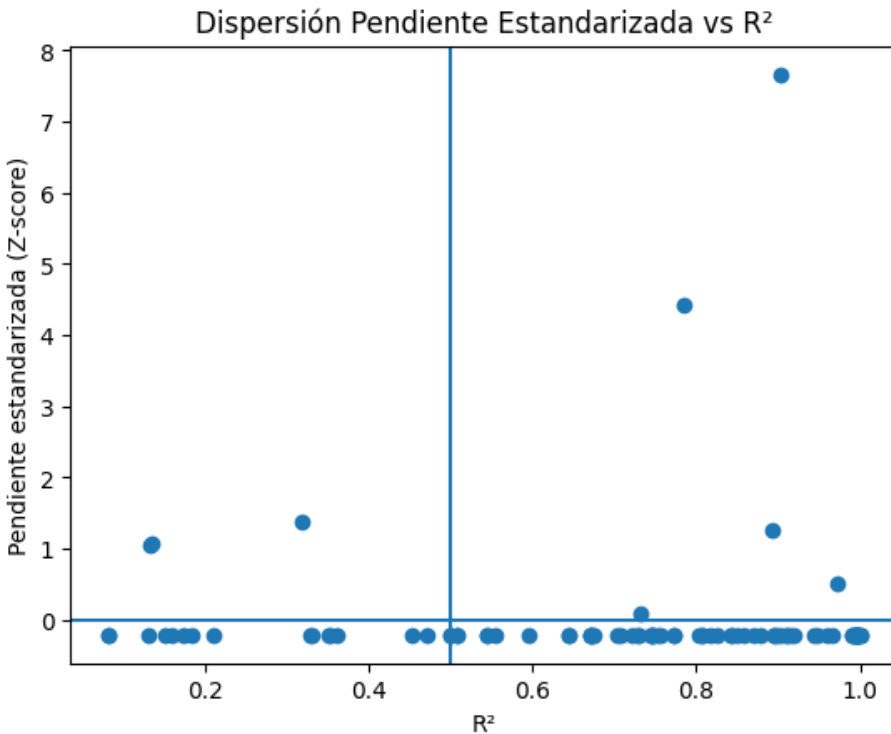
5.9.2 Distribución general de los indicadores y hallazgos estadísticos globales

La dispersión del conjunto de los 89 indicadores en el plano R^2 -Z-score global revela un patrón asimétrico y diagnósticamente significativo. La gran mayoría de los indicadores se concentra en la región próxima a $Z \approx 0$ con valores de R^2 superiores a 0.50, lo que indica que el perfil predominante del sistema ambiental salvadoreño es de cambios graduales estadísticamente robustos, no de transformaciones disruptivas generalizadas. Los outliers positivos de alta intensidad (con Z-scores que alcanzan valores de hasta 6 y 7.5 desviaciones estándar por encima de la media) son escasos y corresponden a indicadores específicos de producción eléctrica renovable en términos absolutos, indicadores de ahorro ajustado en valores monetarios, producción pesquera y disponibilidad hídrica. Simétricamente, la ausencia de outliers negativos de magnitud equivalente indica que los procesos de deterioro ambiental, aunque documentados y consistentes, operan con una velocidad de cambio moderada y homogénea, mientras que los procesos de transformación positiva presentan mayor heterogeneidad en su intensidad relativa.

El análisis del R^2 como indicador de robustez estadística refuerza la solidez del diagnóstico: la gran mayoría de los indicadores se ubica a la derecha de $R^2 = 0.50$, muchos superan $R^2 > 0.80$ y varios alcanzan valo-

res próximos a $R^2 = 1$. Esta concentración confirma que las tendencias identificadas en el período 2000–2024 son en su mayoría estructurales, no fluctuaciones coyunturales, y que el modelo lineal explica una proporción elevada de la variabilidad temporal de los indicadores. Desde la perspectiva del protocolo metodológico del Capítulo III, este resultado valida la selección de los indicadores con $p < 0.05$ como base del análisis sectorial y justifica la confianza en las tendencias identificadas como reflejo de dinámicas sistémicas de largo plazo.

Figura 79. Dispersión pendiente estandarizada (Z-score global) versus R^2 para los 89 indicadores ambientales de El Salvador (2000–2024)



La concentración de puntos cerca de $Z \approx 0$ con $R^2 > 0.50$ confirma el predominio de cambios graduales y robustos. Los escasos outliers positivos de alta intensidad corresponden a indicadores de producción eléctrica renovable, ahorro ajustado en valores monetarios y producción pesquera. La ausencia de outliers negativos equivalentes revela la asimetría entre la intensidad de los procesos de mejora y la de los procesos de deterioro.

5.9.3 Matriz de cuadrantes: Clasificación estratégica de los indicadores

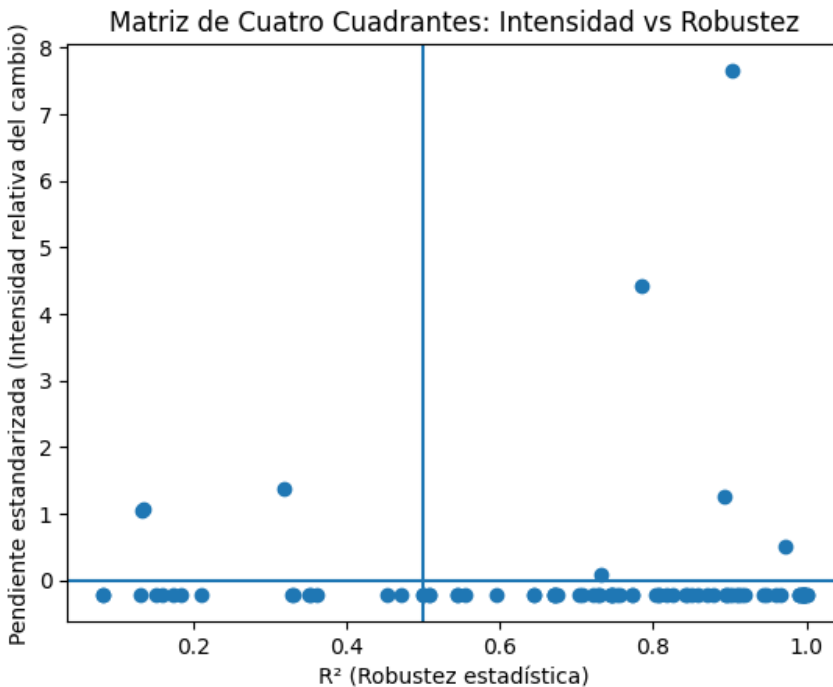
La distribución de los indicadores en los cuatro cuadrantes estratégicos confirma y precisa los hallazgos sectoriales de las secciones precedentes. El Cuadrante IV (baja intensidad, alta robustez) concentra el 73 % de los indicadores, representando el patrón dominante del sistema ambiental salvadoreño: una evolución gradual, estable y estadísticamente consolidada que no genera señales de alerta inmediatas, pero que, en el caso de los indicadores de deterioro, acumula presión sobre los ecosistemas de manera silenciosa. Este hallazgo tiene implicaciones directas para el diseño de sistemas de monitoreo ambiental: un sistema calibrado únicamente para detectar cambios abruptos sería incapaz de capturar la señal más relevante del sistema ambiental salvadoreño, que es precisamente la acumulación gradual y robusta de presiones sobre los componentes de Estado.

El Cuadrante III (baja intensidad, baja robustez) agrupa el 18 % de los indicadores, identificando las áreas de mayor vulnerabilidad estructural del sistema. Aquí se concentran indicadores hídricos y de ahorro neto que exhiben patrones de alta volatilidad interanual, con tendencias débiles que podrían responder a shocks climáticos o económicos más que a dinámicas estructurales sostenidas. Esta categoría es coherente con los hallazgos del capítulo introductorio sobre la alta exposición de El Salvador a perturbaciones hidrometeorológicas: los indicadores de disponibilidad hídrica y ahorro económico son precisamente los más sensibles a la variabilidad climática, y su posición en el Cuadrante III refleja esta sensibilidad estructural.

El Cuadrante I (alta intensidad, alta robustez) agrupa apenas el 5,6 % de los indicadores, representando las transformaciones estructurales

fuerzas y consolidadas del sistema. En el análisis con Z-scores globales, un único indicador no monetario ocupa esta posición con claridad: la producción de electricidad a partir de fuentes renovables excluyendo hidroeléctrica, con $R^2 = 0.9038$ y $Z\text{-score} \approx 6.17$. Este hallazgo es estadísticamente preciso y conceptualmente importante: la transición energética renovable es el único cambio de alta intensidad y robustez en el sistema ambiental salvadoreño cuando se evalúa en el contexto global de todos los indicadores. Los indicadores monetarios de ahorro ajustado y producción pesquera también se posicionan en este cuadrante, pero responden en parte a factores de nominación monetaria y expansión de la actividad acuícola que amplifica artificialmente sus Z-scores. Finalmente, el Cuadrante II (alta intensidad, baja robustez) concentra el 3,3 % de los indicadores, señales de alerta que requieren monitoreo continuo por exhibir cambios fuertes estadísticamente inestables, posiblemente asociados a shocks exógenos puntuales.

Figura 80. Matriz de cuatro cuadrantes: intensidad del cambio (pendiente estandarizada Z) versus robustez estadística (R^2) para los 89 indicadores ambientales



El 73 % de los indicadores se ubica en el Cuadrante IV (baja intensidad, alta robustez), confirmando un sistema en evolución gradual y estable. El único indicador claramente en el Cuadrante I (alta intensidad, alta robustez) en la escala global no monetaria es la producción eléctrica renovable, que emerge como el principal vector de transformación estructural del sistema.

5.9.4 Análisis sectorial de transformaciones estructurales: Puntajes Z intra-sector

La aplicación de puntajes Z calculados dentro de cada sector (en lugar del Z-score global) permite identificar los indicadores que representan las transformaciones más intensas en el contexto específico de su subsistema, independientemente de su magnitud relativa frente a indicadores de otros sectores. Este análisis intrasectorial es metodológicamente necesario para evitar la invisibilización de transformaciones relevantes en sectores cuyas unidades de medición son inherentemente más comprimidas que las de sectores con grandes valores absolutos, como la energía eléctrica o el ahorro monetario.

En el subsector de agua y saneamiento, los indicadores de transformación estructural más intensa son el acceso a servicios básicos de saneamiento (con pendiente de 0.334 puntos porcentuales anuales, $R^2 = 0.9966$ y Z-sectorial = 1.26) y el acceso a instalaciones básicas de higiene en zonas rurales (pendiente de 0.155 puntos porcentuales anuales, $R^2 = 0.9593$ y Z-sectorial = 0.87). La precisión de estos valores estadísticos revela un matiz analítico importante que el análisis global no capturaba: el cambio estructural en este sector se concentra en la expansión de la cobertura básica, no en los servicios gestionados de forma segura. Esta distinción tiene implicaciones directas para la política pública: el sistema hídrico-sanitario salvadoreño se encuentra en una etapa intermedia de transición en la que el avance en acceso no ha sido acompañado de un avance equivalente en calidad gestionada del servicio, brecha ya identificada en el capítulo introductorio al documentar que menos del 20 % de las aguas residuales reciben tratamiento.

En el sector energético, la producción de electricidad renovable mantiene su posición dominante también en el análisis sectorial, con Z -sectorial = 2.27, confirmando que la transformación de la matriz eléctrica no se limita a la expansión del acceso (que ya exhibía alta cobertura desde el inicio del período), sino que implica una modificación estructural en la composición de la generación eléctrica. Los demás indicadores energéticos (acceso a combustibles limpios, acceso a electricidad) muestran alta robustez, pero menor intensidad relativa dentro del sector, lo que es estadísticamente coherente con el patrón de universalización que estos indicadores exhiben: cuando un indicador se aproxima al 100 %, su pendiente se amortigua naturalmente por el efecto techo. En el sector de emisiones y clima, los indicadores de cambio estructural más destacados son las emisiones totales de CO₂ en términos porcentuales respecto a 1990 (pendiente = 4.78 puntos porcentuales anuales, $R^2 = 0.7726$, Z -sectorial = 1.87) y las emisiones totales de GEI (pendiente = 1,83 %, $R^2 = 0.7218$, Z -sectorial = 0.40), cuyas pendientes positivas señalan el crecimiento estructural de las emisiones agregadas documentado en IV.5, con el transporte como principal vector, al tiempo que los indicadores de intensidad de carbono del PIB muestran cambios más graduales, coherentes con el desacoplamiento relativo identificado en la misma sección.

5.9.5 Síntesis estratégica: El modelo de transición ambiental incremental

La integración de los resultados del análisis de cuadrantes y los Z -scores sectoriales permite formular una caracterización estadísticamente precisa del modelo de transformación ambiental de El Salvador en el período 2000–2024. El sistema ambiental nacional no presenta una transformación disruptiva generalizada. En cambio, exhibe un patrón de evolución incremental, estructuralmente robusto y sectorialmente diferenciado, articulado en torno a tres dinámicas de distinta naturaleza: el sector energético opera como el núcleo dinámico de la transformación, con la producción eléctrica renovable como el único indicador de alta intensidad y alta robustez en la escala global; el sector hídrico-sanitario avanza de manera progresiva y estadísticamente sólida en la

expansión de la cobertura básica, sin haber alcanzado aún la fase de sofisticación en la calidad gestionada del servicio; y el sector de emisiones refleja ajustes macroestructurales asociados a la dinámica económica y a la transición energética, con reducciones en la intensidad de carbono del PIB que no compensan el crecimiento de las emisiones absolutas en el sector transporte.

Esta caracterización tiene tres implicaciones estratégicas directamente vinculadas con las orientaciones del marco teórico del Capítulo II y con el diseño de los escenarios prospectivos del Capítulo V. En primer lugar, la transición energética constituye el eje estructural del cambio ambiental y debe ser consolidada como política de Estado con extensión hacia la descarbonización del transporte, que actualmente opera fuera de la lógica transformadora que domina el sector eléctrico. En segundo lugar, la política hídrica requiere una segunda transición (de la expansión de cobertura básica hacia la gestión de calidad) cuya ausencia constituye la principal brecha del sistema sociosanitario identificada en el análisis FMPEIR. En tercer lugar, la alta concentración de indicadores en el Cuadrante III (baja intensidad, baja robustez) en las dimensiones hídrica y de ahorro neto señala áreas de vulnerabilidad estructural que serán amplificadas bajo los escenarios de estrés climático intensificado del Capítulo V, precisamente porque la volatilidad de estos indicadores refleja su sensibilidad a las perturbaciones hidrometeorológicas que el cambio climático hará más frecuentes e intensas.

5.10 Síntesis sistémica bajo el modelo FMPEIR: Conclusiones del estudio

La síntesis que cierra el presente análisis no es una recapitulación de los hallazgos sectoriales, sino una lectura sistémica de segundo orden: una interpretación del sistema ambiental salvadoreño como un todo coherente, cuyas propiedades emergentes (las que solo son visibles cuando se contempla el conjunto y no las partes aisladas) ofrecen las conclusiones de mayor alcance para la ciencia, la política pública y la gobernanza ambiental. Esta lectura se estructura en torno a seis dimensiones analíticas interrelacionadas: el diagnóstico integrado del estado

actual del sistema (IV.10.1), la lógica causal que conecta los cinco componentes FMPEIR en El Salvador (IV.10.2), la evaluación de los avances y las brechas estructurales no resueltas (IV.10.3), las implicaciones del ISSA y su proyección para la política ambiental (IV.10.4), los factores de riesgo y las condiciones de sostenibilidad de largo plazo (IV.10.5), y las orientaciones de investigación y gobernanza que se derivan de los resultados (IV.10.6).

5.10.1 El estado actual del sistema: Un perfil ambiental en transición asimétrica

El Salvador en 2023 es un sistema ambiental en transición, pero en una transición que no es homogénea ni completa. El ISSA de 0.608 (con cobertura de cuatro dimensiones) sitúa al país en un nivel de sostenibilidad sistémica medio-alto en el contexto de su trayectoria histórica, pero el perfil radar FMPEIR revela que ese valor agregado esconde una asimetría estructural profunda: la dimensión de Respuestas institucionales y de servicios básicos ($R \approx 1.0$) ha alcanzado su techo de mejora en términos de cobertura, las Fuerzas Motrices ($F \approx 0.85$) exhiben la tendencia positiva más reciente, las Presiones ($P \approx 0.60$) muestran avance moderado, pero el Estado ecosistémico ($E \approx 0$) y los Impactos sobre el capital natural ($I \approx 0$) registran los valores más críticos de toda la escala.

Esta asimetría no es una curiosidad estadística: es la representación más precisa de la paradoja central del desarrollo ambiental salvadoreño en el siglo XXI. El país ha logrado avances extraordinarios en la dimensión de servicios básicos, avances que son reales, verificables, estadísticamente robustos y que han tenido consecuencias directas sobre la salud y el bienestar de millones de personas, pero esos avances se han producido sin que los componentes biofísicos del sistema (los bosques, los cuerpos de agua, la biodiversidad, el suelo) hayan experimentado una recuperación equivalente. Más aún: algunos de ellos han continuado deteriorándose mientras los indicadores sociosanitarios mejoraban, generando una trayectoria de disociación entre el bienestar humano inmediato y la salud ecosistémica de largo plazo que define el principal desafío de sostenibilidad del país.

5.10.2 La lógica causal del sistema FMPEIR en El Salvador: Cinco dimensiones en interacción

La aplicación del modelo FMPEIR al análisis de El Salvador ha permitido reconstruir la lógica causal del sistema ambiental nacional con un nivel de precisión empírica que va más allá de los diagnósticos cualitativos tradicionales. Las Fuerzas Motrices (F) identificadas (urbanización acelerada, estructura productiva agroindustrial, transición demográfica, crecimiento del parque vehicular y patrones de consumo en transformación) actúan como los motores estructurales que generan la demanda de recursos naturales y los flujos de contaminación que presionan el sistema. La interacción entre estas fuerzas no es aditiva, sino multiplicativa: la combinación de alta densidad demográfica (la mayor de América continental), urbanización concentrada en la cuenca del río Lempa y estructura productiva intensiva en agua ha generado un nivel de presión per cápita sobre los ecosistemas que no tiene equivalente en la subregión centroamericana.

Las Presiones (P) resultantes, emisiones crecientes del sector transporte, extracción hídrica que opera en los umbrales del estrés severo, deforestación acumulada, generación de residuos sin sistemas de gestión integral, se materializan en el Estado (E) biofísico más crítico del perfil FMPEIR: una cobertura forestal que ha perdido 7 puntos porcentuales en tres décadas, con solo el 38 % de cobertura arbórea restante frente al 65 % del potencial natural; un sistema hídrico en el que ninguno de los 122 sitios de monitoreo alcanza la categoría de buena o excelente calidad; una biodiversidad bajo presión sostenida con tendencia creciente en el número de especies amenazadas tanto terrestres como acuáticas; y un suelo que pierde 59 millones de toneladas métricas anuales por erosión. Los Impactos (I) de este estado ecosistémico se expresan simultáneamente en la dimensión sanitaria (enfermedades de transmisión hídrica, exposición a contaminantes, vulnerabilidad ante eventos extremos), en la dimensión económica (US\$215 millones anuales en pérdidas de servicios forestales, costos recurrentes de los desastres hidrometeorológicos) y en la dimensión social, distribución desigual de la carga ambiental que afecta desproporcionadamente a las comunidades rurales, pescadores artesanales y hogares de bajos ingresos en zonas de riesgo periurbano.

Las Respuestas (R) institucionales desplegadas en el período analizado han sido, como documenta el análisis del ISSA, la dimensión más dinámica del sistema. La expansión de la cobertura de saneamiento, agua potable y combustibles limpios; la transformación de la matriz eléctrica hacia fuentes renovables; la ratificación del Acuerdo de París y la elaboración de la NDC actualizada; los programas de restauración ecosistémica en el marco de RECLIMA y el Fondo Verde del Clima; y el fortalecimiento del marco normativo ambiental constituyen un acervo de respuestas institucionales cuya efectividad en las dimensiones de servicios básicos es empíricamente sólida. La brecha, sin embargo, está en que las Respuestas han sido predominantemente reactivas al deterioro ya materializado en los Impactos sanitarios y han avanzado más lentamente en la dimensión de prevención y restauración del Estado ecosistémico, que es precisamente donde el ciclo causal FMPEIR genera los riesgos de mayor irreversibilidad.

5.10.3 Los avances: Lo que el análisis confirma con solidez empírica

Antes de documentar las brechas, es metodológicamente riguroso reconocer con precisión los avances que el análisis ha confirmado con solidez estadística, porque son reales, significativos y relevantes para el diseño de política pública. El primer avance es la transición socio-sanitaria: la eliminación casi completa de la defecación al aire libre, la expansión del acceso a agua potable gestionada de forma segura, la universalización práctica del acceso a combustibles limpios en áreas urbanas y la reducción documentada de la mortalidad atribuible a causas ambientales constituyen logros de salud pública que representan décadas de inversión institucional y que tienen efectos directos, medibles y sostenidos sobre el bienestar de la población salvadoreña. Estos avances no son marginales: son transformaciones estructurales confirmadas estadísticamente con R^2 cercanos a 1 y tendencias que se mantienen robustas a lo largo de todo el período analizado.

El segundo avance es la transición energética renovable: la transformación de la matriz eléctrica desde una dependencia casi exclusiva de

los combustibles fósiles hacia una generación que supera el 60 % de las fuentes renovables (con la energía solar fotovoltaica como la palanca de cambio más reciente y acelerada) es el único cambio ambiental de alta intensidad y robustez estadística en el análisis global de los 89 indicadores. Este logro tiene triple dimensión: ambiental (reducción de la intensidad de carbono de la generación eléctrica), económica (reducción de la dependencia de combustibles importados) y social (mejora de la seguridad energética nacional). El tercer avance, más reciente y todavía en consolidación, es el incremento en el acceso a electricidad en zonas rurales y la convergencia territorial en los indicadores de servicios básicos, que representa una mejora significativa en la distribución espacial del acceso al bienestar ambiental y una reducción de las históricas brechas entre el campo y la ciudad.

5.10.4 Las brechas estructurales: Lo que el análisis revela como desafíos no resueltos

El análisis multidimensional del ISSA y del perfil radar FMPEIR permite identificar cinco brechas estructurales que el período analizado no ha resuelto y que representan los desafíos centrales de la sostenibilidad ambiental salvadoreña para las próximas décadas. La primera y más crítica es la brecha del Estado ecosistémico: el componente E del ISSA es el único que ha permanecido en los valores más bajos de la escala a lo largo de todo el período 2000–2024, y su trayectoria reciente es de deterioro, no de recuperación. La cobertura forestal continúa disminuyendo, la calidad hídrica no alcanza en ningún punto de monitoreo los umbrales de buena calidad, la biodiversidad está bajo presión creciente y el suelo continúa erosionándose a tasas que comprometen la productividad agrícola y la regulación hídrica. Esta brecha es la más grave porque los daños ecosistémicos acumulan irreversibilidad: una especie extinta no puede recuperarse, un bosque primario destruido requiere décadas o siglos para alcanzar su madurez ecológica, y un acuífero contaminado puede tardar generaciones en restaurarse.

La segunda brecha es la del tratamiento de aguas residuales: con menos del 20 % de las aguas residuales recibiendo tratamiento adecuado, El

Salvador dispone de sistemas de saneamiento que recogen los efluentes domésticos, pero no los tratan antes de devolverlos a los cuerpos de agua receptores. Esta brecha —ya documentada en el capítulo introductorio y confirmada por los puntajes bajos en los indicadores de calidad hídrica— crea una paradoja perversa: la expansión del acceso a saneamiento mejorado, que es un avance en la dimensión de Respuesta, genera simultáneamente un aumento en el volumen de aguas residuales sin tratar, que es un deterioro en la dimensión de Presiones sobre los ecosistemas acuáticos. La tercera brecha es la del transporte: el sector responsable del 44 % del consumo energético final opera casi exclusivamente con combustibles fósiles importados y exhibe la tendencia de crecimiento de emisiones más acelerada de toda la economía. Ninguna de las políticas de transición energética identificadas en el período analizado ha logrado penetrar de manera estructural en este sector, que continúa siendo el obstáculo principal para el cumplimiento de las metas NDC.

La cuarta brecha es la de los residuos sólidos: la generación de 5,000–6,500 toneladas diarias sin un sistema nacional de gestión integral representan una presión creciente sobre los ecosistemas —especialmente los acuáticos y costeros— y sobre la salud pública que los indicadores disponibles no capturan con suficiente precisión por la limitada cobertura estadística de esta dimensión. La quinta brecha es la de la fragmentación institucional: la dispersión de competencias ambientales entre MARN, MAG, MOP, MINSAL, CEL y las municipalidades, sin un marco de coordinación que permita abordar los problemas ambientales en su dimensión sistémica, reduce la efectividad de las Respuestas y genera incoherencias entre las políticas sectoriales que pueden neutralizar avances logrados en una dimensión con retrocesos en otra.

5.10.5 El ISSA como instrumento de gobernanza: Implicaciones de la trayectoria y la proyección

La trayectoria histórica del ISSA y su proyección al 2050 ofrecen tres conclusiones directamente aplicables a la gobernanza ambiental nacional. La primera es que el sistema ambiental salvadoreño tiene capaci-

dad de recuperación: el incremento del ISSA desde ≈ 0.27 en el peor momento de la crisis del conflicto armado hasta 0.60 en 2023 demuestra que las inversiones sostenidas en las dimensiones de Respuesta y en la reducción de las presiones más directamente ligadas a la salud pública generan resultados medibles y acumulativos. Esta capacidad de recuperación es una base de optimismo fundamentado, que contrasta con los enfoques catastrofistas que ignoran la evidencia de los avances reales.

La segunda conclusión es que alcanzar los hitos proyectados —ISSA de 0.75 en 2030— requiere necesariamente revertir la tendencia de la dimensión E (Estado ecosistémico), que actualmente actúa como el principal lastre del índice. Si la dimensión E permanece próxima a cero mientras las demás dimensiones continúan mejorando, el ISSA alcanzará un techo estructural significativamente inferior al proyectado por el modelo tendencial, que asume implícitamente que todas las dimensiones contribuyen positivamente al crecimiento del índice. La inversión en restauración ecosistémica (bosques, cuencas hidrográficas, manglares, suelos agrícolas degradados) no es solo un imperativo ambiental: es una condición económica para el mantenimiento de los servicios de regulación hídrica, control de erosión y captura de carbono sobre los que descansa la productividad agrícola y la disponibilidad de agua potable que sostiene los avances sanitarios.

La tercera conclusión es que las bandas de confianza de la proyección —con una amplitud que en 2030 cubre un rango de 0.126 puntos (de 0.682 a 0.808) y en 2050 de 0.096 puntos (de 0.864 a 0.960)— representan una incertidumbre genuina que no puede reducirse con más estadística: depende de decisiones de política pública y de la evolución de factores externos como la intensidad del cambio climático. Bajo el escenario de alta resiliencia —inversión acelerada en restauración, descarbonización del transporte, gestión integral del agua—, el sistema puede alcanzar el límite superior de la banda. Bajo el escenario de alta vulnerabilidad climática y política pasiva, el deterioro de la dimensión E puede llevar el ISSA hacia el límite inferior o por debajo de él. El diseño de la política ambiental para el período 2025–2030 determinará en qué parte de ese rango de incertidumbre se situará el sistema ambiental salvadoreño.

5.10.6 El vector transversal de la transición energética y sus límites

Uno de los hallazgos más sólidos y menos esperados del presente análisis es que la transición energética renovable actúa como el único vector de transformación ambiental de alta intensidad y robustez estadística en el conjunto de los 89 indicadores evaluados. Esta posición de unicidad en el análisis de cuadrantes no significa que todos los demás cambios sean insignificantes: significa que la producción eléctrica renovable es el indicador que ha experimentado la mayor transformación relativa en el sistema, con el Z-score más alto y el R² más elevado de toda la distribución. Esta centralidad de la transición energética en el perfil de cambio del sistema tiene implicaciones directas para la arquitectura de la política ambiental.

La transición energética es un vector transversal porque sus efectos no se limitan a la dimensión de Presiones climáticas: también reduce la presión extractiva sobre los bosques (al sustituir la leña como fuente de energía doméstica), mejora la calidad del aire interior (al eliminar la combustión de biomasa en los hogares), genera beneficios económicos al reducir la dependencia de combustibles importados y fortalece la resiliencia del sistema eléctrico ante la volatilidad de los precios internacionales del petróleo. Sin embargo, la misma lógica que explica la centralidad de la transición energética en el análisis también revela su límite estructural: la transición ha ocurrido en el sector eléctrico, que representa solo el 56 % del consumo energético final, mientras que el sector transporte —responsable del 44 % restante— permanece prácticamente al margen de la transformación. Una transición energética que no alcanza al transporte no puede reducir las emisiones absolutas del país: puede mejorar la intensidad de carbono del PIB y del sector eléctrico, pero no puede cumplir los compromisos de la NDC sin una penetración profunda en la electrificación del transporte y en la eficiencia de los vehículos de combustión.

5.10.7 La vulnerabilidad climática como amplificador sistémico de las brechas

El análisis del ISSA y del perfil FMPEIR adquiere su plena dimensión cuando se lee en el contexto del riesgo climático que caracteriza al país. El Salvador se encuentra entre los 20 países más afectados del mundo por el riesgo climático (Índice Global de Riesgo Climático, Germanwatch 2023), con una exposición documentada a sequías, inundaciones, deslizamientos y tormentas tropicales que genera pérdidas económicas recurrentes y que se proyecta que se intensificará en las próximas décadas según los escenarios del IPCC (2022) para América Central. En este contexto, las brechas estructurales identificadas en el presente análisis no son problemas estáticos: son vulnerabilidades que el cambio climático amplificará sistémicamente.

La brecha del Estado ecosistémico (cobertura forestal insuficiente, calidad hídrica comprometida, biodiversidad bajo presión) reduce directamente la capacidad de resiliencia del sistema ante los eventos extremos que el cambio climático hará más frecuentes e intensos. Un bosque degradado no puede amortiguar las inundaciones con la misma eficacia que uno en buen estado; un suelo erosionado pierde su capacidad de infiltración y retención de agua; un cuerpo de agua ya contaminado tiene menos capacidad de autodepuración ante cargas adicionales generadas por eventos de precipitación intensa. La brecha del estrés hídrico — con extracciones que ya operan en los umbrales del estrés severo en años de sequía — será amplificada por las proyecciones de reducción de la disponibilidad hídrica en América Central, que el IPCC (2022) estima en un 10–30 % para mediados de siglo bajo los escenarios de calentamiento de 2 °C. La brecha del transporte — sector de mayor crecimiento de emisiones — contribuye a la acumulación global de GEI que alimenta el cambio climático que, a su vez, amplifica todas las demás vulnerabilidades del sistema.

Esta cadena de retroalimentaciones entre las brechas del FMPEIR y la vulnerabilidad climática configura el escenario de riesgo sistémico más relevante para la política ambiental salvadoreña: un escenario en el que la incapacidad de resolver las brechas ecosistémicas y energéticas en los próximos diez años podría generar puntos de inflexión que

desplazarían la trayectoria del ISSA desde la senda logística ascendente hacia un escenario de estancamiento o retroceso. La prevención de ese escenario no es solo una responsabilidad ambiental: es una condición económica, social y de seguridad nacional. siguientes

5.10.8 Orientaciones para la investigación y la gobernanza: de los resultados a la acción

Los resultados del presente análisis permiten formular orientaciones concretas para la investigación futura y para la gobernanza ambiental, que se organizan en tres niveles de acción correspondientes a los plazos de la política pública.

En el corto plazo (2025–2030), la prioridad de investigación más urgente es el desarrollo de indicadores de seguimiento del componente E (Estado ecosistémico) con mayor resolución temporal y espacial que los actualmente disponibles en las series del BM. La dimensión de Estado es la más crítica del ISSA y la que exhibe mayor volatilidad e incertidumbre, pero paradójicamente es la que cuenta con menor densidad de series de datos de alta frecuencia. En particular, el desarrollo de sistemas de monitoreo de la calidad hídrica basados en sensores remotos y estaciones automáticas, la actualización anual del inventario de cobertura forestal mediante teledetección y la construcción de índices de biodiversidad a nivel de ecosistema —y no solo de especies amenazadas— fortalecerían significativamente la capacidad diagnóstica del ISSA en su componente más crítico. En el plano de la gobernanza, la prioridad de corto plazo es la aprobación e implementación efectiva de la NDC 3.0 con metas sectoriales vinculantes que incluyan al transporte como sector obligado de reducción de emisiones, y la creación de un mecanismo de coordinación interinstitucional que permita articular las respuestas de MARN, MAG, MOP, MINSAL, CEL y las municipalidades en torno a metas compartidas de mejora del ISSA por dimensión.

En el mediano plazo (2030–2040), la prioridad de investigación es la evaluación de los escenarios alternativos del ISSA: mientras el modelo tendencial proyecta un ISSA de 0.859 en 2040, la ausencia de inter-

vención en la dimensión E podría generar una trayectoria significativamente inferior. El desarrollo de modelos de simulación sistémica que integren las retroalimentaciones entre las cinco dimensiones FMPEIR (especialmente las que conectan el deterioro ecosistémico con la vulnerabilidad climática y los impactos económicos) permitiría reducir la incertidumbre de las proyecciones y ofrecer a los tomadores de decisión información más precisa sobre los umbrales críticos que podrían desencadenar deterioros irreversibles. En el plano de la gobernanza, la prioridad de mediano plazo es la implementación a escala de los programas de restauración ecosistémica comprometidos en la NDC —la meta de restaurar un millón de hectáreas para 2030 en el marco de RE-CLIMA— con sistemas de monitoreo que permitan verificar los avances en la dimensión E del ISSA y ajustar las intervenciones en función de los resultados observados.

En el largo plazo (2040–2050), el horizonte de investigación más relevante es la evaluación de la transición estructural completa: si El Salvador logra mantener la trayectoria ascendente del ISSA y alcanzar los valores proyectados de 0.925 en 2050, habrá completado una transformación ambiental de alcance histórico —desde los mínimos del conflicto armado en los años ochenta hasta niveles de sostenibilidad sistémica alta— en el espacio de tres cuartos de siglo. Documentar esa transición, identificar sus factores determinantes y extraer lecciones para otros países en desarrollo constituye una contribución a la ciencia de la sostenibilidad de primer orden. En el plano de la gobernanza, el horizonte de largo plazo sugiere que la sostenibilidad del sistema ambiental en 2050 dependerá en última instancia de la profundidad de la transformación ecosistémica: un país que ha universalizado el acceso a servicios básicos, ha transformado su matriz eléctrica y ha avanzado en la descarbonización del transporte, pero que no ha invertido lo suficiente en restaurar sus bosques, sus cuencas y su biodiversidad, habrá logrado una modernización ambiental incompleta que pondrá en riesgo sus propios logros al socavar las bases ecológicas sobre las que descansan.

5.10.9 Conclusión: El sistema ambiental salvadoreño en perspectiva histórica y prospectiva

El Salvador de 2024 es un país que ha recorrido una distancia notable en su trayectoria de sostenibilidad ambiental —el ISSA ha pasado de los mínimos históricos de la crisis del conflicto armado a valores medios-altos en el período reciente—, pero que no ha terminado la transición y que enfrenta riesgos sistémicos que podrían interrumpirla o revertirla si las brechas estructurales identificadas no son abordadas con la urgencia y la escala que requieren. La geometría del perfil radar FMPEIR de 2023 condensa esta situación con una elocuencia que ningún análisis sectorial aislado puede capturar: un polígono profundamente asimétrico, con un vértice muy elevado en Respuestas y tres vértices muy próximos al centro del radar en Estado, Impactos y Presiones, es la representación geométrica de un sistema que ha avanzado mucho más rápido en la respuesta a los síntomas que en la atención a las causas.

El hallazgo más general y de mayor alcance del presente estudio es que la sostenibilidad ambiental no puede construirse solo desde la dimensión de los servicios básicos y la transición energética eléctrica, por valiosos e imprescindibles que sean esos avances. Requiere también —y de manera prioritaria en el caso de El Salvador dado el estado crítico de la dimensión E— una transición ecosistémica: la restauración activa de la cobertura forestal, la recuperación de la calidad de los cuerpos de agua, la protección efectiva de la biodiversidad y la detención de la erosión del suelo. Sin esa transición ecosistémica, el sistema ambiental salvadoreño seguirá siendo un sistema en transición incompleta: avanzado en los componentes que generan bienestar humano inmediato, pero vulnerable en los componentes que garantizan la continuidad de ese bienestar en el largo plazo.

La proyección del ISSA al 2050 ofrece el horizonte de referencia: un valor de 0.925 es técnicamente alcanzable bajo el supuesto de continuidad y aceleración de las políticas actuales. No obstante, ese valor solo será posible —y solo significará una sostenibilidad sistémica genuina y no solo estadística— si el polígono FMPEIR de 2050 es sustancialmente

más simétrico que el de 2023: si la dimensión de Estado ecosistémico ha convergido hacia los niveles que sus dimensiones complementarias han alcanzado antes. El presente análisis ha construido la base empírica para orientar esa convergencia. Corresponde a la gobernanza ambiental, a la investigación científica y a la sociedad salvadoreña en su conjunto decidir si la oportunidad que esa base representa será aprovechada.

Referencias

- Adger, W. N. (2006). *Vulnerability*. *Global Environmental Change*, 16(3), 268–281. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006>
- Adger, W. N., Arnell, N. W. y Tompkins, E. L. (2005). Successful adaptation to climate change across scales. *Global Environmental Change*, 15(2), 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2004.12.005>
- Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA). (1999). *Environmental indicators: Typology and overview*. EEA Technical Report No. 25. <https://www.eea.europa.eu/publications/TEC25>
- Bai, J., y Perron, P. (2003). Computation and analysis of multiple structural change models. *Journal of Applied Econometrics*, 18(1), 1–22. <https://doi.org/10.1002/jae.659>
- Banco Mundial. (2021). *Un acuerdo verde para El Salvador: infraestructura verde forestal para la generación de ingresos y servicios*. Banco Mundial. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/746491608699984194/pdf/A-Green-Deal-for-El-Salvador-Forest-Based-Green-Infrastructure-for-Income-and-Services.pdf>
- Banco Mundial. (2022). *World Development Report 2022: Finance for an Equitable Recovery*. World Bank. <https://www.worldbank.org/en/publication/wdr2022>
- Banco Mundial. (2024). *World Development Indicators*. World Bank Open Data. <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators>
- Berkes, F. y Folke, C. (Eds.). (1998). *Linking Social and Ecological Systems: Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience*. Cambridge University Press. https://assets.cambridge.org/97805217/85624/excerpt/9780521785624_excerpt.pdf

- Blaikie, P. y Brookfield, H. (1987). *Land Degradation and Society*. Methuen. <https://archive.org/details/landdegradations0000blai>
- Bullard, R. D. (1990). *Dumping in Dixie: Race, Class, and Environmental Quality*. Westview Press. <https://doi.org/10.4324/9780429495274>
- Carpenter, S. R., Walker, B., Anderies, J. M. y Abel, N. (2001). From metaphor to measurement: Resilience of what to what? *Ecosystems*, 4(8), 765–781. <https://doi.org/10.1007/s10021-001-0045-9>
- Clark, W. C. y Dickson, N. M. (2003). Sustainability science: The emerging research program. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(14), 8059–8061. <https://doi.org/10.1073/pnas.1231333100>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2023). CEPALSTAT: *Bases de datos y publicaciones estadísticas*. CEPAL. <https://statistics.cepal.org/portal/cepalstat/>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2023). *Informe del proceso regional de América Latina y el Caribe para la aceleración del cumplimiento del ODS 6*. CEPAL. https://www.cepal.org/sites/default/files/events/files/informe_del_proceso_regional_de_america_latina_y_el_caribe_para_la_aceleracion_del_cumplimiento_del_ods_6_.pdf
- Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (CMMAD). (1987). *Nuestro Futuro Común (Informe Brundtland)*. Organización de las Naciones Unidas. <https://www.are.admin.ch/are/en/home/media/publications/sustainable-development/brundtland-report.html>
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC). (2015). *Acuerdo de París*. UNFCCC. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>

- Convenio sobre la Diversidad Biológica (CBD). (2022). *Marco Mundial Kunming-Montreal de la Diversidad Biológica*. Decisión 15/4, COP 15. CBD. <https://www.cbd.int/doc/decisions/cop-15/cop-15-dec-04-en.pdf>
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P. y van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387, 253–260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Creswell, J. W., y Plano Clark, V. L. (2018). *Designing and Conducting Mixed Methods Research* (3rd ed.). SAGE Publications. <https://us.sagepub.com/en-us/nam/designing-and-conducting-mixed-methods-research/book241842>
- Daily, G. C. (Ed.). (1997). *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Island Press. <https://islandpress.org/books/natures-services>
- Daly, H. E. (1990). Toward some operational principles of sustainable development. *Ecological Economics*, 2(1), 1–6. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/092180099090010R>
- Daly, H. E. (1996). *Beyond Growth: The Economics of Sustainable Development*. Beacon Press. https://www.uwosh.edu/sirt/wp-content/uploads/sites/86/2017/08/Daly_Beyond-Growth.pdf
- Dietz, T., Ostrom, E. y Stern, P. C. (2003). The struggle to govern the commons. *Science*, 302(5652), 1907–1912. <https://doi.org/10.1126/science.1091015>
- Dirección General de Energía, Hidrocarburos y Minas (DGEHM). (2024). *Estadísticas de la Dirección General de Energía Hidrocarburo y Minas*. <https://estadisticas.dgehm.gob.sv/>
- Dirección General de Estadística y Censos (DIGESTYC). (2022). *Encuesta de Hogares de Propósitos Múltiples 2022: Principales resultados*.

Ministerio de Economía, Gobierno de El Salvador. https://ophi.org.uk/sites/default/files/2023-12/bcr_publicacion_ehpm_2022.pdf

Economía de los Ecosistemas y la Biodiversidad (TEEB). (2010). *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Mainstreaming the Economics of Nature*. PNUMA. <https://www.cbd.int/financial/values/g-accounting-teeb.pdf>

Ekins, P., Simon, S., Deutsch, L., Folke, C. y De Groot, R. (2003). A framework for the practical application of the concepts of critical natural capital and strong sustainability. *Ecological Economics*, 44(2–3), 165–185. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00272-0](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00272-0)

Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an>

Esty, D. C., y Córdova-Novion, C. (2012). Environmental sustainability index: Benchmarking national environmental stewardship. *Journal of Industrial Ecology*, 5(3), 57–78. https://www.researchgate.net/publication/312449406_Environmental_sustainability_index_Benchmarking_national_environmental_stewardship_New_Haven

Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA). (2005). *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Island Press. <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>

Fischer-Kowalski, M. (1998). Society's metabolism: The intellectual history of materials flow analysis. *Journal of Industrial Ecology*, 2(1), 61–78. <https://doi.org/10.1162/jiec.1998.2.1.61>

Folke, C., Carpenter, S., Walker, B., Scheffer, M., Elmqvist, T., Gunderson, L. y Holling, C. S. (2004). Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management. *Annual Review of Ecology*,

Evolution, and Systematics, 35, 557–581. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.35.021103.105711>

Folke, C., Hahn, T., Olsson, P. y Norberg, J. (2005). Adaptive governance of social-ecological systems. *Annual Review of Environment and Resources*, 30, 441–473. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.30.050504.144511>

Fondo Verde para el Clima (GCF). (2018). *Proyecto RECLIMA Resiliencia climática en los agroecosistemas del corredor seco de El Salvador*. <https://openknowledge.fao.org/items/1bac51c2-b49c-42e2-833f-22726b907720>

Freudenberg, M. (2003). *Composite Indicators of Country Performance: A Critical Assessment*. OECD Science, Technology and Industry Working Papers 2003/16. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/405566708255>

Gallopín, G. C. (2006). Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Global Environmental Change*, 16(3), 293–303. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.004>

Geels, F. W. (2002). Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: A multi-level perspective and a case-study. *Research Policy*, 31(8–9), 1257–1274. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(02\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(02)00062-8)

Germanwatch. (2025). *Global Climate Risk Index 2023*. Germanwatch e.V. <https://www.germanwatch.org/sites/default/files/2025-11/CRI%2026%20full%20report.pdf>

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and*

Vulnerability. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*. IPCC. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability — Cross-Chapter Paper 4: Central and South America*. En H.-O. Pörtner et al. (Eds.), *Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.021>

Gunderson, L. H. y Holling, C. S. (Eds.). (2002). *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*. Island Press. <https://islandpress.org/books/panarchy>

Hartwick, J. M. (1977). Intergenerational equity and the investing of rents from exhaustible resources. *American Economic Review*, 67(5), 972–974. <https://www.jstor.org/stable/1828079>

Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 1–23. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>

Kates, R. W., Clark, W. C., Corell, R., Hall, J. M., Jaeger, C. C., Lowe, I., McCarthy, J. J., Schellnhuber, H. J., Bolin, B., Dickson, N. M., Faucheux, S., Gallopin, G. C., Grübler, A., Huntley, B., Jäger, J., Jodha, N. S., Kasperson, R. E., Mabogunje, A., Matson, P. y Mooney, H. (2001). Sustainability science. *Science*, 292(5517), 641–642. <https://doi.org/10.1126/science.1059386>

Loorbach, D., Frantzeskaki, N. y Avelino, F. (2017). Sustainability transitions research: Transforming science and practice for societal change. *Annual Review of Environment and Resources*, 42, 599–626. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102014-021340>

- Martínez, V., Lee, D., Alyami, I., Zimila, H., Bautista, F., Fuentes, A., López, M. J., Valencia, G., López, M., Arnold, R., Quanrud, D. y Sáez, E. (2023). Contaminación del agua en El Salvador: evaluación de la calidad del agua de los ríos y estudio preliminar de la presencia de contaminantes orgánicos emergentes. *ECA Estudios Centroamericanos*, 78(775), 21–49. <https://revistas.uca.edu.sv/index.php/eca/article/view/8014>
- Martínez-Alier, J. (2002). *The Environmentalism of the Poor: A Study of Ecological Conflicts and Valuation*. Edward Elgar. <https://doi.org/10.4337/9781843765486>
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). (2019). *Plan Nacional de Cambio Climático de El Salvador*. MARN. <https://faolex.fao.org/docs/pdf/els218552.pdf>
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). (2022). *Informe de la calidad del agua de los ríos de El Salvador 2022*. MARN. <https://www.snet.gob.sv/UserFiles/hidrologia/CalidaAgua2022.pdf>
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). (2021). *Contribución Nacionalmente Determinada actualizada de El Salvador (NDC 2021)*. MARN/CMNUCC. <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/EI%20Salvador%20NDC-%20Updated%20Dic.2021.pdf>
- Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Resolución A/RES/70/1. Asamblea General de las Naciones Unidas. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- Nardo, M., Saisana, M., Saltelli, A., Tarantola, S., Hoffmann, A., y Giovannini, E. (2005). *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide*. OECD Statistics Working Paper. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/533411815016>

- Norgaard, R. B. (1994). *Development Betrayed: The End of Progress and a Co-evolutionary Revisioning of the Future*. Routledge. https://www.academia.edu/24167096/Development_Betrayed_The_End_of_Progress_and_a_Coevolutionary_Revisioning_of_the_Future
- OCDE/JRC. (2008). *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264043466-en>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2020). *Global Forest Resources Assessment 2020*. FAO. <https://doi.org/10.4060/ca9825en>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2023). *FAOSTAT: Base de datos estadísticos de la FAO*. FAO. <https://www.fao.org/faostat/en/#home>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2022). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2022: La transformación azul en acción*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cc0461es>
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). (2017). *Education for Sustainable Development Goals: Learning Objectives*. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247444>
- Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). (2025). *Generación eléctrica en América Latina y el Caribe*. OLADE. https://www.olade.org/wp-content/uploads/2025/05/Reporte-ALC-Generacion-Electrica-Dic24_Rev4_TR-07042025.pdf
- Organización Mundial de la Salud (OMS) y Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF). (2023). *Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2022: Special focus on gender*. WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme

(JMP). <https://www.who.int/publications/m/item/progress-on-household-drinking-water--sanitation-and-hygiene-2000-2022---special-focus-on-gender>

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2021). *Guías de calidad del aire de la OMS: Actualización mundial 2021*. OMS. https://programa-calac.com/wp-content/uploads/2021/11/Castillo_AQG_Spanish.pdf

Organización Panamericana de la Salud (OPS/PAHO). (2022). *Portal de indicadores básicos OPS*. <https://opendata.paho.org/es/indicadores-basicos/tablero-de-los-indicadores-basicos>

Ostrom, E. (1990). *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807763>

Ostrom, E. (2009). A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 325(5939), 419–422. <https://doi.org/10.1126/science.1172133>

Ostrom, E. (2010). Beyond markets and states: Polycentric governance of complex economic systems. *American Economic Review*, 100(3), 641–672. <https://doi.org/10.1257/aer.100.3.641>

Pearce, D. W. y Turner, R. K. (1990). *Economics of Natural Resources and the Environment*. Harvester Wheatsheaf. https://www.researchgate.net/publication/31662420_Economics_of_natural_resources_and_the_environment_DW_Pearce_RK_Turner

Peet, R. y Watts, M. (Eds.). (2004). *Liberating political ecology. Liberation Ecologies: Environment, Development, Social Movements*. (2nd ed., pp. 3–47). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203235096>

Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas (IPBES). (2019). *Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services*. IPBES Secretariat. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673>

- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y MARN. (2022). *El Salvador actualiza sus Contribuciones Nacionalmente Determinadas*. PNUD. <https://www.undp.org/es/el-salvador/comunicados-de-prensa/el-salvador-presenta-actualizacion-de-su-compromiso-climatico-en-cumplimiento-del-acuerdo-de-paris>
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2020). *Human Development Report 2020: The Next Frontier — Human Development and the Anthropocene*. UNDP. <https://hdr.undp.org/content/human-development-report-2020>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP). (2019). *Global Environment Outlook 6: Healthy Planet, Healthy People*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108627146>
- Quiroga Martínez, R. (2009). *Guía metodológica para desarrollar indicadores ambientales y de desarrollo sostenible en países de América Latina y el Caribe*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/5502>
- Robbins, P. (2012). *Political Ecology: A Critical Introduction* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., de Wit, C. A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U. y Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461, 472–475. <https://doi.org/10.1038/461472a>
- Sachs, J. D. (2015). *The Age of Sustainable Development*. Columbia University Press. <https://doi.org/10.7312/sach17314>
- Saisana, M., y Tarantola, S. (2002). *State-of-the-Art Report on Current Methodologies and Practices for Composite Indicator Development*. European Commission Joint Research Centre. <https://>

www.researchgate.net/profile/Michaela-Saisana/publication/305392511_State-of-the-art_report_on_current_methodologies_and_practices_for_composite_indicator_development/links/578ccb9708ae59aa668146a3/State-of-the-art-report-on-current-methodologies-and-practices-for-composite-indicator-development.pdf

Schlosberg, D. (2007). *Defining Environmental Justice: Theories, Movements, and Nature*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199286294.001.0001>

Solow, R. M. (1993). An almost practical step toward sustainability. *Resources Policy*, 19(3), 162–172. [https://doi.org/10.1016/0301-4207\(93\)90001-4](https://doi.org/10.1016/0301-4207(93)90001-4)

Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., de Vries, W., de Wit, C. A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G. M., Persson, L. M., Ramanathan, V., Reyers, B. y Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1259855>

Teddlie, C., y Tashakkori, A. (2009). *Foundations of Mixed Methods Research: Integrating Quantitative and Qualitative Approaches in the Social and Behavioral Sciences*. SAGE Publications. https://www.researchgate.net/publication/365368935_Foundations_of_Mixed_Methods_Research_Integrating_Quantitative_and_Qualitative_Approaches_in_Social_and_Behavioral_Sciences

Toledo, V. M. (2013). El metabolismo social: una nueva teoría socioecológica. *Relaciones. Estudios de Historia y Sociedad*, 34(136), 41–71. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-39292013000400004&lng=es&nrm=iso

- UNEP. (2021). *Measuring Progress: Environment and the SDGs*. United Nations Environment Programme. <https://www.unep.org/resources/report/measuring-progress-environment-and-sdgs>
- Viceministerio de Transporte (VMT). (2023). *Estadísticas del parque vehicular registrado en El Salvador 2023*. Ministerio de Obras Públicas, Infraestructura, Vivienda y Desarrollo Urbano. <https://observatoriovial.fonat.gob.sv/datos-estadisticos/>
- Walker, B., Holling, C. S., Carpenter, S. R. y Kinzig, A. (2004). Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecology and Society*, 9(2), 5. <https://doi.org/10.5751/ES-00650-090205>



Este libro se terminó de imprimir
en el mes de mayo de 2026
en los talleres de Tecnoimpresos, S.A. de C.V.
19ª. Av. Norte N.º 125,
ciudad de San Salvador, El Salvador, C.A.

En 2012, la Universidad Tecnológica de El Salvador (UTEC) presentó a la comunidad académica y nacional el Libro Verde UTEC: Estado del medioambiente y perspectiva de sostenibilidad. Aquella obra constituyó un hito institucional: representó el esfuerzo sistemático por compilar evidencia, ordenar diagnósticos y formular orientaciones estratégicas en torno a los principales desafíos ambientales del país. En un contexto regional aún marcado por enfoques sectoriales y fragmentados, el Libro Verde ofreció una visión integradora que vinculaba estado ambiental, impactos y respuestas de política, inspirada en las metodologías de evaluación ambiental integral promovidas por organismos internacionales.

La Colección Investigaciones tiene el objetivo de evidenciar el trabajo científico de la Universidad Tecnológica de El Salvador ante la comunidad científica nacional e internacional, y la sociedad.

No hay enseñanza sin investigación ni investigación sin enseñanza
Pablo Freire



ISBN: 978-99961-86-52-3



9 789996 186523

Vicerrectoría de Investigación y Proyección Social

Calle Arce y 19ª avenida Sur n.º 1045, edificio *Dr. José Adolfo Araujo Romagoza*,
San Salvador, El Salvador, (503) 2275 1011 / 2275 1013