

GEMELOS DIGITALES
Hacia una supervisión ambiental moderna

RICARDO MACHUCA BREÑA

GEMELOS DIGITALES

Hacia una supervisión ambiental moderna

PALESTRA EDITORES

LIMA – 2026

	<p>Machuca Breña, Ricardo Gemelos digitales. Hacia una supervisión ambiental moderna / Ricardo Machuca Breña; 1.ª ed - Lima: Palestra Editores; 2026. 000 pp.; 14.5 x 20.5 cm. D. L.: 2026- ISBN: 978-612-325- 1.</p>
--	---

GEMELOS DIGITALES
Hacia una supervisión ambiental moderna
Ricardo Machuca Breña

Primera edición, abril 2026

© 2026: RICARDO MACHUCA BREÑA
© 2026: PALESTRA EDITORES S. A. C.
Plaza de la Bandera 125, Pueblo Libre, Lima, Perú
Telf. (+511) 6378902 - 6378903
palestra@palestraeditores.com / www.palestraeditores.com

Impresión y encuadernación:
ENOTRIA S. A.
Av. Nicolás Ayllón 2890, Ate, Lima
Abril, 2026

Cuidado de estilo y edición:
JESÉ DAVID ARIAS AGUILA

Diagramación:
ENRIQUE TOLEDO NAVARRO

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N.º 2026-
ISBN: 978-612-325-

Tiraje: 500 ejemplares

Impreso en Perú / Printed in Peru

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. QUEDA PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE ESTA OBRA, BAJO NINGUNA FORMA O MEDIO, ELECTRÓNICO O IMPRESO, INCLUYENDO FOTOCOPIADO, GRABADO O ALMACENADO EN ALGÚN SISTEMA INFORMÁTICO, SIN EL CONSENTIMIENTO POR ESCRITO DE LOS TITULARES DEL *COPYRIGHT*.

A mi padre, a quien extraño con toda mi alma.

*Y al profesor Jorge González Izquierdo,
cómplice de una de sus últimas sonrisas.*

CONTENIDO

Lista de siglas y abreviaturas	9
Presentación	15
Prólogo.....	23
Nota del editor	
<i>Prender la antorcha</i>	27
Introducción	31

PRIMERA PARTE EL AMBIENTE TAMBIÉN ES ECONOMÍA Y SOCIEDAD

I. El ambiente sí importa.....	39
II. Valoración ambiental: aventura y orden	49
III. Convergencia en la valoración ambiental.....	57

CONTENIDO

SEGUNDA PARTE QUÉ QUIERE EL PUEBLO: ¿ECONOMÍA O AMBIENTE?

IV. Desarrollo insostenible.....	63
V. El engranaje ambiental peruano	75
VI. Ministerio del Ambiente: ¿promotor de la inversión?.....	119

TERCERA PARTE SUPERVISIÓN AMBIENTAL FALLIDA

VII. Más tecnología, menos viáticos	129
VIII. ¿Supervisión basada en riesgos?.....	135
IX. Ausencias: los criterios ASG y los ODS 2030	141

CUARTA PARTE GEMELOS DIGITALES

X. Cuidando a los gemelos	149
XI. GIS + BIM.....	153
XII. Compartiendo cepillo de dientes.....	165
XIII. Ruta hacia una supervisión ambiental moderna	173
Bibliografía.....	187

LISTA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

ANA	:	Autoridad Nacional del Agua
BCRP	:	Banco Central de Reserva del Perú
BIM	:	<i>Building Information Modeling</i> (en español Modelado de Información de la Construcción)
BM	:	Banco Mundial
ASG	:	Criterios ambiente, social y gobernanza (traducción del inglés <i>Environmental, Social and Governance, ESG</i>)
CCN	:	Contabilidad del Capital Natural (del inglés <i>Natural Capital Accounting, NCA</i>)
CNP	:	Contribuciones de la Naturaleza para las Personas (traducción del inglés <i>Nature's Contributions to People, NCP, IPBES</i>)
DIA	:	Declaración de impacto ambiental
EHS	:	Principios ambiente, salud y seguridad (traducción del inglés <i>Environment, Health and Safety</i>)
EFA	:	Entidad de Fiscalización Ambiental

EIA	:	Estudio de Impacto Ambiental (en inglés <i>Environmental Impact Assessment</i>). En el Perú también puede encontrarse la forma EsIA, aunque EIA es la más empleada a nivel nacional e internacional.
EIA-d	:	Estudio de impacto ambiental detallado
EIA-sd	:	Estudio de impacto ambiental semidetallado
ESRI	:	<i>Environmental Systems Research Institute</i> (empresa líder en el desarrollo de software GIS, creadora de ArcGIS)
IDEP	:	Infraestructura de Datos Espaciales del Perú
IPBES	:	<i>Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services</i> (en español Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas)
GIS	:	<i>Geographic Information System</i> (en español Sistema de Información Geográfica, SIG)
LEAP	:	Enfoque del TNFD <i>Locate, Evaluate, Assess, Prepare</i> (Localizar, Evaluar, Analizar y Preparar)
LiDAR	:	<i>Light Detection and Ranging</i> (tecnología de detección y medición por luz utilizada en sistemas GIS y teledetección)
NU	:	Naciones Unidas
OCDE	:	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (del inglés <i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i> , OECD)
ODS	:	Objetivo de Desarrollo Sostenible
OEFA	:	Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental
PAMA	:	Programa de adecuación y manejo ambiental
Osinergmin	:	Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería del Perú

LISTA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

PBE	:	Producto Bruto de los Ecosistemas
PBI	:	Producto Bruto Interno
SCAE	:	Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica
SEIA	:	Sistema Nacional de Evaluación de Impactos Ambientales
Sernanp	:	Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado
Senace	:	Servicio Nacional de Certificación Ambiental para las Inversiones Sostenibles
Sinacui	:	Sistema Nacional de Acuicultura
Sinafor	:	Sistema Nacional de Gestión Forestal y de Fauna Silvestre
Sinagerd	:	Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastre
SNGRH	:	Sistema Nacional de Gestión de Recursos Hídricos
Sinanpe	:	Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado
Sinefa	:	Sistema Nacional de Evaluación y Fiscalización Ambiental
SNGA	:	Sistema Nacional de Gestión Ambiental
Sinia	:	Sistema Nacional de Información Ambiental
TNFD	:	Taskforce on Nature-related Financial Disclosures (Grupo de Trabajo sobre Divulgaciones Financieras Relacionadas con la Naturaleza)
WEF	:	<i>World Economic Forum</i> (en español Foro Económico Mundial)

*Todo sistema está perfectamente diseñado
para obtener los resultados que produce.*

— W. EDWARDS DEMING

*Debemos diseñar instituciones para que incluso
los malos gobernantes no puedan causar demasiado daño.*

— KARL POPPER

PRESENTACIÓN

Este libro tiene un propósito ambiental subversivo, rebelde, casi revolucionario: supervisar diferente, supervisar mejor. La supervisión ambiental es, en esencia, un par de ojos del Estado sobre el territorio. Con este libro, pretendo afinar esos ojos: volverlos más inteligentes, más oportunos y más justos. Y, para ello, como podrán comprobar más adelante, necesitamos más tecnología y menos viáticos.

La idea de escribir un libro sobre gemelos digitales, o *digital twins*, surgió durante mis estudios de maestría en Economía Ambiental y Gestión Ambiental en la Universidad de York, en Reino Unido (2021-2022). La posibilidad de replicar una entidad física en un entorno digital (gemelo), reflejando su comportamiento real, me llamó poderosamente la atención, y vi con claridad su posible aplicación en el fiscalizador ambiental peruano: el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), fuente oficial de información sobre el cumplimiento ambiental empresarial en los principales sectores económicos del Perú, cuya rectoría guía el andar del Sistema Nacional de Evaluación y Fiscalización Ambiental (Sinefa).

En general, el principal reto del fiscalizador peruano es lograr que las supervisiones —también llamadas visitas o inspecciones— sean unos ojos potentes y alertas que permitan detectar y actuar preventivamente sobre cualquier indicio de contaminación, ocasionada por las actividades económicas realizadas por más de 28 000 unidades operativas (unidades fiscalizables), correspondientes a más de 17 000 empresas (administrados), distribuidos en todo el Perú¹. Es decir, una empresa puede tener una o muchas más unidades.

Como si el gran número de unidades y empresas bajo alcance del OEFA no fuera suficiente, debemos agregar la extensión de nuestro territorio, el cual es aproximadamente 28.8 veces más grande que Dinamarca, 496 veces más grande que Luxemburgo y 2.6 veces más extenso que Alemania. Países que ocupan los tres primeros puestos en el Índice de Desempeño Ambiental (EPI, por sus siglas en inglés), según el World Economic Forum (WEF). Sumémosle, además, la singular morfología peruana, caracterizada por una geografía montañosa, agreste, con altiplanicies y valles interandinos. Ahí está el reto de la supervisión.

Del numeroso universo de unidades y empresas —micro, pequeñas, medianas y grandes—, así como de la amplia extensión del territorio peruano, surge la principal necesidad de una supervisión moderna y virtualizada. Sin embargo, no debemos dejar de lado el acotado presupuesto económico institucional, el cual no crece

1 Es preciso señalar que las cifras reportadas corresponden al pedido de acceso a la información pública con Expediente N.º 2025-E01-033592. Asimismo, estas cifras son bastante conservadores respecto al verdadero número de administrados fiscalizables, el cual podría superar largamente el millón. Por ejemplo, solo en el sector industria, la exposición de motivos del Decreto Supremo N.º 006-2019-PRODUCE, mediante el cual se modificó el Reglamento de la Gestión Ambiental para la Industria Manufacturera y Comercio Interno N.º 017-2015-PRODUCE, muestra un universo de 612 558 administrados.

en la misma medida en que se transfieren nuevas competencias de fiscalización y, por ende, nuevas unidades y empresas.

Cada nueva competencia incorpora sectores con dinámicas operativas propias, riesgos ambientales específicos y culturas de cumplimiento aún incipientes. Este escenario introduce una nueva curva de aprendizaje tanto para las empresas como para el propio fiscalizador ambiental, lo que complejiza la tarea preventiva y reduce la capacidad de llegar a tiempo para evitar la generación de contaminación ambiental en el país. En muchos casos, la supervisión apenas alcanza una visita anual. En ese contexto, herramientas como los gemelos digitales pueden convertirse en aliados estratégicos para acortar esa curva, facilitar la comprensión de los riesgos ambientales y promover el cumplimiento preventivo desde etapas tempranas.

A estas condiciones inamovibles y exógenas a las funciones del fiscalizador ambiental peruano —número y tamaño de unidades y empresas, extensión y complejidad del territorio, así como el presupuesto— también hay que sumar los aspectos humanos y técnicos que constituyen, en teoría, los elementos más controlables dentro del reto institucional. Justamente por la posibilidad de incidir sobre ellos, en este libro se efectúa un análisis crítico de ambos, como anticipo para desarrollar la idea y proponer la implementación de los gemelos digitales en la supervisión ambiental.

Aunque la conceptualización del libro tiene poco más de un par de años, mi acercamiento a la información ambiental del OEFA se forjó tiempo atrás. Como analista económico, en un esfuerzo académico personal, pude detectar más de ocho mil supervisiones inconclusas y muchas otras sin contabilizarse. Al año siguiente, estos números preocupantes seguían en ascenso, pero al compartir mi análisis con las autoridades institucionales, se pudo detener

y enfrentar el problema²; aunque hoy aún se sienten los efectos negativos con vigencia pertinaz.

Conozco el OEFA desde sus entrañas. Trabajo allí desde hace más de once años, y puedo decir que aún existe un amplio espacio de mejora, tanto en materia técnica ambiental como —sobre todo— en la forma en que se registra, almacena y procesa la información, lo cual amerita una revisión crítica de lo ya difundido. De hecho, aunque las supervisiones del OEFA comenzaron en 2010, los sistemas institucionales no cuentan con una arquitectura informática que permita almacenar la información debidamente sistematizada, trazable y de calidad. Cada unidad fiscalizable nace fallidamente: sin documento de identidad, sin historia, y sin cimientos sólidos para construir sobre ella.

A esta criticidad debemos sumar otra tan grave como la anterior. Una institución ambiental moderna no puede darle la espalda a la aplicación de herramientas técnico-visuales del Sistema de Información Geográfica (SIG, por sus siglas en español, o GIS, por sus siglas en inglés) en el desarrollo de sus propias funciones. En adelante, se utilizará la sigla GIS para mantener coherencia con la terminología empleada por las plataformas internacionales de *software*. Cuando hablo de darle la espalda, no me refiero únicamente a integrar en una plataforma la infraestructura de datos espaciales del Perú (IDEP), empleada por otras instituciones, sino al hecho de que la propia institución genere información primaria sobre sus unidades y caracterice el comportamiento ambiental de sus empresas. Por ejemplo, actualmente, en su gran mayoría, las unidades no se encuentran georreferenciadas a nivel de polígonos

2 Una visión de este problema se puede apreciar en el anuario 2017 del OEFA [Consulta web: 29 de mayo de 2025]. Seguir el siguiente enlace: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1478225/%20Memoria%20Anual%202017.pdf?v=1607533286>

(perímetro del espacio físico de estas). Asimismo, los componentes, las instalaciones y los ambientes que conforman las unidades tampoco se encuentran georreferenciados. En la práctica, no se conoce visualmente el área que comprenden las unidades y, menos aún, lo que existe dentro de ellas.

De otro lado, los compromisos asumidos en los estudios de impacto ambiental (EIA) por las empresas —de cumplimiento obligatorio— no se encuentran georreferenciados. Solo pueden encontrarse en archivos PDF denominados “matrices de obligaciones fiscalizables”. Y, aunque cada año se visita la misma unidad fiscalizable, ni la matriz de obligaciones ni la información producto de las supervisiones (el *checklist* de las matrices) se encuentran en algún formato GIS visualmente apreciable. De hecho, la institución guarda con hermeticidad estas matrices en PDF o, lo que es más criticable aún, no las comparte con los administrados. Si la idea es promover el cumplimiento, me pregunto: ¿por qué, al menos, no compartir esas matrices con las propias empresas?

A través de la tecnicidad deben surgir las soluciones a los grandes problemas ambientales del país —la herramienta de gemelos digitales es una de ellas—, ya sea desde el empresariado, las autoridades ambientales, la sociedad civil, o desde estos tres agentes en conjunto. No obstante, dicha tecnicidad se nutre de la información disponible. Si no existe información confiable, las decisiones que se adopten frente a un problema se tomarán a ciegas, despilfarrando así el dinero invertido en la protección ambiental. La evidencia de esta deficiencia la encontramos frecuentemente en las noticias: derrames de petróleo en la costa y la selva; derrames de relaves mineros; desapariciones de humedales u otros cuerpos de agua en la sierra; contaminación de cultivos y pastoreo por la minería; cierres

de minas inexistentes y sobrecostos enormes que dejan un terrible daño ecológico³, entre muchos otros.

Es verdad también que, después de las noticias —o en paralelo—, se observan publicaciones en redes sociales advirtiendo de la presencia del OEFA en el lugar contaminado, pero esto solo evidencia una política reactiva frente a los problemas ambientales. Nunca, o muy rara vez, preventiva.

Como se aprecia, la aplicación de gemelos digitales en la fiscalización ambiental vendrá como consecuencia de contar con información sistematizada, trazable y de calidad, características que harán transitar al OEFA hacia un enfoque holístico de naturaleza preventiva en la fiscalización, donde la necesidad de salir a campo se reducirá progresivamente. He aquí otro gran reto: más inversión en tecnología, menos gasto —y malgasto— en viáticos.

En conclusión, herramientas como los gemelos digitales permitirán apreciar el manejo del bosque y no solo del árbol; el estado de la casa y no solo el refrigerador; y, en el caso del OEFA, el desempeño ambiental de cada unidad y no solo un punto geográfico en algún lugar de dicha unidad. Todo ello con información espacial GIS confiable.

Por eso, el mensaje de fondo de este libro es la prevención. Prevenir no es crear más oficinas ni multiplicar trámites. Eso no es estar cerca del territorio. Estar cerca del territorio es conocerlo con evidencia, con inteligencia y con tecnología. Es reemplazar la supervisión reactiva por una supervisión moderna: más tecnología, menos viáticos.

El esfuerzo institucional por incorporar herramientas como los gemelos digitales no se agotaría en el ámbito del OEFA. Su desarrollo y aplicación resultarían perfectamente replicables por las

3 Desco (2024). Aruntani, la mala de la película. Internet [visto 13 de enero de 2026]. Enlace: <https://www.desco.org.pe/aruntani-la-mala-de-la-pelicula>

Entidades de Fiscalización Ambiental (EFA), que operan a nivel nacional, regional y local conforme a sus competencias. Estas entidades enfrentan realidades territoriales diversas y desafíos operativos propios, que hacen aún más valiosa la incorporación de herramientas tecnológicas que fortalezcan la prevención ambiental.

Cuando dicha replicabilidad no sea posible, el fiscalizador ambiental podría diseñar herramientas facilitadoras que mejoren el trabajo de las EFA y armonicen los criterios de supervisión en todo el territorio. Este potencial se vería fortalecido mediante una descentralización estratégica del OEFA, entendida no como mayor presencia administrativa, sino como un mecanismo para acercar inteligencia preventiva ambiental allí donde el riesgo está presente y articular eficazmente la acción entre el ente rector y las EFA.

Los invito a leer este libro no como una promesa futurista, sino como una ruta posible. La tarea recién comienza: estamos contra el tiempo. Si estas páginas logran abrir conversación, incomodar inercias y empujar mejoras concretas, entonces habrán cumplido su propósito: que los ojos del Estado vean mejor, lleguen antes y actúen con justicia.

Las poblaciones cercanas a las empresas —y las propias empresas— necesitan confiar en el Estado. Promoción de la inversión, sí; deterioro ambiental, no.

Este libro gritará en cada una de sus páginas: hagamos algo.