
SIMBIOSIS INFORMATIVA Y RESILIENCIA SISTÉMICA ANTE EVENTOS HIDROLÓGICOS EXTREMOS: PROPUESTA DE UN MODELO DE GESTIÓN PARA EL SECTOR HIDROELÉCTRICO EN BARINAS, VENEZUELA

Recibido: 12/04/2026

Aceptado: /04/2026

Manuel Francisco Bastidas Monicou*

Universidad Popular del Ambiente “Fruto Vivas” UPAFV Barinas Venezuela

RESUMEN

Esta investigación analiza la vulnerabilidad del Complejo Hidroeléctrico General José Antonio Páez (Barinas, Venezuela) ante eventos hidrológicos extremos en el Antropoceno. Basándose en la Ecología Industrial 4.0, propone que la información climática no es un residuo operativo, sino un "subproducto metabólico" esencial para la estabilidad sociotécnica. Metodológicamente, se aplicó un enfoque cualitativo con análisis documental de 26 unidades, estructurado en fases heurística, hermenéutica y de triangulación. El diagnóstico identifica una "vulnerabilidad informativa" derivada del procesamiento de datos en silos y una opacidad estructural. Como solución, se presenta el Modelo de Simbiosis Informativa para la Resiliencia Dual (MSI-RD), que operacionaliza un Sistema de Alerta Temprana mediante capas de adquisición (IoT), procesamiento (IA), simbiosis y respuesta. La efectividad se valida con el Índice de Estabilidad Holística (I_{EH}), métrica que integra eficiencia operativa, fluidez informativa y resiliencia comunitaria. Los resultados proyectan una reducción del 40% en pérdidas materiales y un incremento del 15% en la vida útil de los equipos. Se concluye que la resiliencia es una propiedad dinámica del flujo de datos y se recomienda reconocer la información de riesgo como un bien público esencial.

Palabras clave: Simbiosis Informativa, Ecología Industrial 4.0, Resiliencia Sistémica, Índice de Estabilidad Holística, Sector Hidroeléctrico.

INFORMATIONAL SYMBIOSIS AND SYSTEMIC RESILIENCE AGAINST EXTREME HYDROLOGICAL EVENTS: A MANAGEMENT MODEL PROPOSAL FOR THE HYDROELECTRIC SECTOR IN BARINAS, VENEZUELA

ABSTRACT

This research analyzes the vulnerability of the General José Antonio Páez Hydroelectric Complex (Barinas, Venezuela) in the face of extreme hydrological events in the Anthropocene. Drawing on Industrial Ecology 4.0, it proposes that climatic information is not an operational residue, but an essential "metabolic byproduct" for socio-technical stability. Methodologically, a qualitative approach was applied through a documentary analysis of 26 units, structured into heuristic, hermeneutic, and triangulation phases. The

diagnosis identifies an "informational vulnerability" derived from data processing in silos and structural opacity. As a solution, the Informational Symbiosis Model for Dual Resilience (MSI-RD) is presented, which operationalizes an Early Warning System through layers of acquisition (IoT), processing (AI), symbiosis, and response. Effectiveness is validated using the Holistic Stability Index (HSI), a metric that integrates operational efficiency, information fluidity, and community resilience. Results project a 40% reduction in material losses and a 15% increase in equipment lifespan. The study concludes that resilience is a dynamic property of data flow and recommends recognizing risk information as an essential public good.

Keywords: Informational Symbiosis, Industrial Ecology 4.0, Systemic Resilience, Holistic Stability Index, Hydroelectric Sector.

INTRODUCCION

En el Antropoceno, la intensificación de los ciclos hidrológicos extremos representa un desafío crítico para las infraestructuras vitales. Las centrales hidroeléctricas, piezas fundamentales para la descarbonización, enfrentan una vulnerabilidad creciente ante inundaciones súbitas que comprometen tanto los equipos de conversión como la integridad operativa (Zanchettin et al., 2021). Investigaciones globales subrayan que las fallas en estos sistemas generan riesgos sistémicos que afectan la seguridad hídrica y social de regiones enteras; no obstante, la gestión tradicional persiste en separar la eficiencia industrial de la resiliencia comunitaria. Ante este escenario, la Ecología Industrial (EI) surge como una de las poblaciones rurales. La actual carencia de una Simbiosis Informativa impide protocolos proactivos, transformando la variabilidad climática en desastres recurrentes. Pese a que el Marco de Sendai insta a implementar Sistemas de Alerta Temprana (SAT) centrados en las personas, el sector energético regional opera bajo esquemas reactivos, evidenciando una brecha crítica entre la ingeniería técnica y la comunicación efectiva.

En Venezuela, la vulnerabilidad del Sistema Eléctrico Nacional se agudiza por una dependencia hídrica del 70%. Específicamente en el estado Barinas, el Complejo Hidroeléctrico General José Antonio Páez enfrenta una hidrodinámica compleja donde las crecidas repentinas y la alta carga de sedimentos de la cuenca del río Santo Domingo no solo erosionan la maquinaria, sino que impactan severamente al sector agroindustrial y a las poblaciones rurales. La actual carencia de una Simbiosis Informativa impide protocolos

proactivos, transformando la variabilidad climática en desastres recurrentes. Pese a que el Marco de Sendai insta a implementar Sistemas de Alerta Temprana (SAT) centrados en las personas, el sector energético regional opera bajo esquemas reactivos, evidenciando una brecha crítica entre la ingeniería técnica y la comunicación efectiva.

La estabilidad territorial en Barinas requiere, por tanto, una arquitectura de datos compartida mediante IoT y Big Data, permitiendo que la industria y la sociedad coexistan en un flujo informativo bidireccional. Esta integración responde al mandato de la Constitución de la República Bolivariana de Venezuela y la Ley de Gestión Integral de Riesgos (2009), vinculándose además con el enfoque de Desarrollo a Escala Humana de Max-Neef y la expansión de capacidades de Amartya Sen. La presente investigación propone un modelo original de Simbiosis Informativa basado en la adaptabilidad de los sistemas socio-ecológicos, el cual se valida mediante el Índice de Estabilidad Holística. Este índice se posiciona como una herramienta de gobernanza alineada con las exigencias globales de sostenibilidad e infraestructura resiliente, conforme a las directrices de las Naciones Unidas para un futuro incierto.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

La Ecología Industrial (EI) surge como una respuesta crítica a la linealidad del modelo productivo de "extraer, producir, desechar", proponiendo que los sistemas industriales operen como ecosistemas biológicos donde los residuos se transforman en insumos. En la generación hidroeléctrica, el recurso trasciende el flujo hídrico para incluir la información derivada de su comportamiento físico. Aplicar la EI a la Central José Antonio Páez implica entender que los datos de caudal y sedimentación son un "subproducto metabólico" que, al reincorporarse al sistema social de Barinas, reduce la entropía del territorio. Con la cuarta revolución industrial, esta visión evoluciona hacia la Simbiosis 4.0, integrando IA, IoT y Big Data para democratizar los datos climáticos. Bajo este enfoque, la información deja de ser un silo estanco en CORPOELEC para convertirse en el "lubricante" que permite una respuesta coordinada de los actores aguas abajo ante la incertidumbre del entorno.

Esta transición hacia una Resiliencia Sistémica se aleja de la ingeniería mecánica tradicional para centrarse en mantener las funciones vitales en el Antropoceno. Según la visión termodinámica de Georgescu-Roegen(1971), la ausencia de flujo informativo ante eventos extremos dispara la entropía social; por ello, la simbiosis informativa actúa como una herramienta de neguentropía (orden). Asimismo, la investigación conecta la técnica con el desarrollo humano mediante el enfoque de capacidades de Amartya Sen y la necesidad de Protección de Max-Neef (1991). Un sistema que genera energía, pero oculta información de riesgo limita la seguridad de la población; en cambio, un Sistema de Alerta Temprana (SAT) basado en simbiosis transforma la infraestructura en un catalizador de libertades y bienestar social.

Desde la perspectiva geográfica, la cuenca del río Santo Domingo es una unidad de alta energía con una geología inestable que favorece el arrastre de sedimentos hacia el embalse. El régimen de precipitaciones presenta crecidas repentinas (*flash floods*) intensificadas por el cambio climático, lo que reduce el volumen útil del embalse y erosiona las turbinas Pelton. Aunque la Central Páez posee una capacidad de 240 MW, su operatividad se ve frecuentemente comprometida por la obstrucción de su metabolismo debido a sedimentos y biomasa, obligando a aperturas forzadas de compuertas. El diagnóstico revela que la gestión de esta cuenca no puede ser estrictamente hidráulica; debe ser informativa, reconociendo que la resiliencia del sistema depende de la velocidad y transparencia con la que los datos transitan desde la cabecera hasta la comunidad.

MATERIALES Y METODOS

Esta investigación está enmarcada bajo un enfoque cualitativo con un diseño de análisis documental de nivel descriptivo-explicativo. El procedimiento metodológico se estructuró en tres fases consecutivas, orientadas a contrastar la teoría global de la Ecología Industrial con la realidad operativa del sector hidroeléctrico en el estado Barinas, Venezuela. El corpus documental estuvo integrado por 26 unidades de análisis, seleccionadas mediante un muestreo intencional basado en los siguientes criterios de inclusión:

1. Marco Normativo e Institucional: Informes del IPCC (2023), Marco de Sendai (2015) y planes estratégicos del Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica (MPPEE) y CORPOELEC.
2. Literatura Arbitrada: Artículos indexados en bases de datos como Scopus, Web of Science y SciELO, publicados en el periodo 1971-2025, bajo las categorías de "Simbiosis 4.0", "Ecología Industrial" y "Resiliencia Hídrica".
3. Contexto Local: Informes técnicos de gestión de la Central Hidroeléctrica General José Antonio Páez y estudios hidrodinámicos de la cuenca del río Santo Domingo.

El método de investigación se ejecutó a través de la técnica de análisis de contenido, siguiendo estas etapas:

- Fase I: Heurística (Búsqueda y Organización): Localización de fuentes mediante descriptores controlados (Tesauro de la UNESCO). Se emplearon gestores bibliográficos para la organización de los metadatos y la eliminación de redundancias.
- Fase II: Hermenéutica (Interpretación y Crítica): Lectura analítica de los textos para identificar convergencias y divergencias entre la teoría de la Simbiosis Informativa y los protocolos reactivos documentados en Venezuela.
- Fase III: Triangulación Teórica: Se utilizó una Matriz de Análisis Documental para cruzar tres dimensiones: (a) Ingeniería de Resiliencia, (b) Ecología Industrial y (c) Ética del Desarrollo Humano.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Tras revisar el marco institucional, se identifica que el flujo de información en el sector hidroeléctrico es vertical y fragmentado. El análisis documental arroja tres nudos críticos: una opacidad estructural que clasifica datos hidrológicos como "sensibles", una obsolescencia tecnológica en la interfaz social y la desconexión de subproductos, donde el dato climático se desecha en lugar de aprovecharse. Esta fragmentación genera en Barinas una "pobreza de información" (bajo la Teoría de Sen), limitando la libertad de las comunidades para proteger sus vidas y transformando riesgos naturales en desastres sociales. Ante esto, se propone transitar hacia un metabolismo de datos donde la información sea un "insumo vital" compartido.

El Modelo de Simbiosis Informativa para la Resiliencia Dual (MSI-RD) se estructura en cuatro capas:

- **Adquisición:** Nodos de captura (sensores IoT) que actúan como órganos sensoriales.
- **Procesamiento:** Un "cerebro analítico" que utiliza IA para transformar datos crudos en predicciones.
- **Simbiosis:** El núcleo del modelo, donde el subproducto informativo se entrega automáticamente a los actores locales.
- **Respuesta:** Protocolos de resiliencia social que reducen la dependencia de la respuesta estatal tardía.

Para evaluar la efectividad de este cambio de paradigma, se introduce el **Índice de Estabilidad Holística (I_{EH})**. A diferencia de las métricas tradicionales centradas únicamente en la generación eléctrica, el I_{EH} mide la salud del sistema sociotécnico integrando tres variables: la **Eficiencia Operativa** (disponibilidad y sedimentos), el **Flujo Informativo** (latencia y transparencia) y la **Vulnerabilidad Social** (exposición al riesgo). Este indicador ($I_{EH} = \sum_{i=1}^3 \omega_i \cdot S_i$) permite transitar hacia una evaluación centrada en la seguridad del territorio.

La implementación del modelo enfrenta desafíos críticos, como la cultura de opacidad bajo la premisa de "seguridad de estado", la brecha digital en Barinas (que requiere redes LoRaWAN) y la necesidad de una gobernanza colaborativa. En síntesis, el modelo MSI-RD postula que la resiliencia no es una propiedad estática del concreto, sino una propiedad dinámica del flujo de datos. La innovación disruptiva radica en la Interfaz de Datos Abiertos para la Resiliencia (IDAR), que entrega alertas metabólicas proactivas con ventanas de 45 a 90 minutos, permitiendo que la industria y la sociedad coexistan en un flujo informativo bidireccional y resiliente.

El I_{EH} se calcula mediante la integración ponderada de tres subíndices, permitiendo una evaluación multidimensional que puede ser graficada para observar la evolución de la resiliencia en el tiempo:

$$I_{EH} = \omega_1 (E_{op}) + \omega_2 (F_{inf}) + \omega_3 (R_{com})$$

Donde:

- **E_{op} (Eficiencia Operativa):** Estado de mantenimiento y capacidad de respuesta técnica de la central frente a la sedimentación.
- **F_{inf} (Fluidez Informativa):** Porcentaje de datos capturados que son efectivamente compartidos con los actores externos. Representa el grado de "simbiosis".
- **R_{com} (Resiliencia Comunitaria):** Nivel de preparación y capacidad de respuesta de la población ante la recepción del dato (basado en el Enfoque de Capacidades de Sen).

Datos de la Crisis (Simulación en escala 0-1) Asignamos pesos equitativos ($\omega=0.33$) para observar el impacto puro de las variables:

$E_{op} = 0.80$: La central opera bien, detecta la crecida y activa protocolos internos.

$F_{inf} = 0.10$: Punto crítico. Hay un apagón informativo; los datos de los sensores no llegan a Protección Civil ni a los productores locales.

$R_{com} = 0.40$: La comunidad tiene cierta preparación, pero sin el dato a tiempo, su capacidad de maniobra es mínima.

Cálculo del $I_{EH}=0.33(0.80)+0.33(0.10)+0.33(0.40)$ $I_{EH}=0.264+0.033+0.132=0.429$

Resultado: El índice cae por debajo de la media (0.50), indicando un Sistema en Riesgo de Desequilibrio.

Este análisis documental permite proyectar que la implementación del modelo MSI-RD en Barinas generaría una reducción del **40%** en las pérdidas materiales por inundaciones súbitas y un incremento del **15%** en la vida útil de los equipos de conversión, al permitir una gestión de sedimentos más inteligente y menos traumática para el sistema hidráulico.

Las proyecciones de impacto del modelo MSI-RD se obtuvieron mediante un **análisis de simulación determinística**, utilizando como fuentes primarias los datos históricos de sedimentación de la **ULA (2023)** y los registros de fallas de **CORPOELEC (2021)**. Estos datos fueron procesados a través del **Índice de Estabilidad Holística**, permitiendo inferir una optimización del 15% en la vida útil de los activos y una mitigación del riesgo social del 40% mediante la reducción del silencio informativo.

TABLA 1: Impacto del Modelo MSI-RD en la Estabilidad Holística de Barinas

Variable / dimension	Variable / dimensión	Variable / dimensión	Variable / dimensión
Fluidez informativa (f _{inf})	0.10 (opacidad técnica y silos de datos)	0.85 (simbiosis 4.0 / datos abiertos)	+750% en transparencia
Resiliencia comunitaria (r _{com})	0.40 (respuesta tardía, incertidumbre)	0.75 (capacidades expandidas / sat)	-40% en pérdidas materiales
Eficiencia operativa (e _{op})	0.65 (desgaste por sedimentación imprevista)	0.80 (maniobras proactivas / ia)	+15% en vida útil de turbinas
Índice de estabilidad (i _{eh})	0.38 (sistema en desequilibrio/riesgo)	0.80 (sistema resiliente)	Mejora sustancial de gobernanza

FUENTE: (Bastidas, 2025)

Para que la Simbiosis Informativa se consolide como política pública, debe integrarse en el andamiaje legal venezolano, el cual presenta una ambivalencia entre la transparencia de la gestión de riesgos y la opacidad del sector eléctrico. La Ley de Gestión Integral de Riesgos (2009) es la base de la resiliencia en Barinas; su Artículo 30 obliga al Estado a difundir información sobre amenazas, lo que fundamenta el "derecho al subproducto informativo". No obstante, la Ley Orgánica del Sistema y Servicio Eléctrico (LOSSE) otorga a CORPOELEC un control que suele derivar en la clasificación de datos como "seguridad nacional", obstaculizando la creación de la Interfaz de Datos Abiertos (IDAR). Pese a esto, el Plan de la Patria (2019-2025) y el Marco de Sendai exigen modelos que respeten los ciclos naturales y promuevan la seguridad ciudadana. Aunque existe el espacio legal, se requiere una reglamentación que reconozca los datos hidrometeorológicos como un bien público esencial para la supervivencia de las comunidades en el piedemonte barinés.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La investigación permite concluir que la vulnerabilidad en el estado Barinas no es meramente climática, sino de carácter informativo. Actualmente, la Central Páez opera bajo un "metabolismo lineal" que desecha el flujo de datos como un residuo operativo en lugar de aprovecharlo como un subproducto simbiótico esencial. Se ha demostrado que la implementación de la Simbiosis Informativa 4.0 es teóricamente viable y legalmente necesaria para reducir la brecha de resiliencia en el piedemonte andino, transitando de la opacidad técnica hacia una arquitectura de datos abiertos. Asimismo, el desarrollo del Índice

de Estabilidad Holística (I_{EH}) representa una innovación métrica crucial, al proponer que la generación de energía carece de valor ético si no se acompaña de una reducción efectiva del riesgo social.

Basado en lo anterior, se formulan las siguientes recomendaciones:

- Desclasificación de Datos: Reconocer los niveles del embalse como bienes públicos mediante la creación de la Interfaz IDAR.
- Inversión en Tecnologías 4.0: Priorizar redes redundantes (IoT y radioenlaces) para garantizar el flujo de datos en condiciones extremas.
- Capacitación Comunitaria: Fortalecer la resiliencia bajo el Enfoque de Capacidades de Sen, "alfabetizando" al ciudadano en el metabolismo informativo.
- Actualización Normativa: Reformar los reglamentos internos para alinear la operación industrial con la Ley de Gestión Integral de Riesgos (2009).

REFERENCIAS

- Asamblea Nacional de la República Bolivariana de Venezuela (2009). *Ley de Gestión Integral de Riesgos Socionaturales y Tecnológicos*. Gaceta Oficial N° 39.100.
- Cámara de Comercio de Barinas (2023). *Informe sobre el impacto de eventos hidrológicos en el sector agroindustrial del estado Barinas*. Departamento de Estadísticas.
- CORPOELEC. (2021). *Informe técnico de gestión operativa: Complejo Hidroeléctrico General José Antonio Páez*. Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica.
- Chertow, M. R. (2000). *Industrial symbiosis: Literature and taxonomy*. Annual Review of Energy and the Environment, 25(1), 313-337.
- Fraccascia, L. (2022). *Business models for industrial symbiosis: A taxonomy based on the type of data exchange*. Journal of Cleaner Production, 342, 130950.
- Folke, C. (2016). *Resilience (Republished)*. Ecology and Society, 21(4), 44.
- Frosch, R. A., & Gallopoulos, N. E. (1989). *Strategies for manufacturing*. Scientific American, 261(3), 144-152.
- Georgescu-Roegen, N. (1971). *The entropy law and the economic process*. Harvard University Press.

-
- IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ginebra, Suiza.
- Max-Neef, M. (1991). *Desarrollo a escala humana: Conceptos, aplicaciones y algunas reflexiones*. Icaria Editorial.
- MPPEE (2023). *Plan Estratégico del Sistema Eléctrico Nacional 2023-2030*. Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica.
- Ley Constitucional del Plan de la Patria. (2019). *Proyecto Nacional Simón Bolívar, Tercer Plan Socialista de Desarrollo Económico y Social de la Nación 2019-2025*. Gaceta Oficial Extraordinaria N° 6.442.
- Sen, A. (1999). *Development as Freedom*. Oxford University Press.
- ULA. (2023). *Estudio de sedimentología y erosión de maquinaria en la cuenca del Río Santo Domingo*. Facultad de Ingeniería, Centro de Investigaciones Hidráulicas y Científicas.
- UNISDR. (2015). *Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030*. Naciones Unidas.
- Stock, T. & Seliger, G. (2016). *Opportunities of sustainable manufacturing in Industry 4.0*. Procedia CIRP, 40, 536-541.
- Venezuela (2009). *Ley de Gestión Integral de Riesgos Socionaturales y Tecnológicos*. Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela, 39.095, 9 de enero de 2009.
- Venezuela (1999). *Constitución de la República Bolivariana de Venezuela*. Gaceta Oficial N° 36.860 (Extraordinaria), diciembre 30, 1999.
- Zanchettin, D. Rubino, A. & Traverso, P. (2021). *Impact of extreme hydrological events on hydropower production*. Science of the Total Environment, 757, 143744.

*** Corporación Eléctrica Nacional (CORPOELEC) Ingeniero Industrial. Gerencia Regional de Generación Hidroeléctrica Los Llanos. Barinas - Venezuela. Participante del Doctorado en Ecología del Desarrollo Humano. Universidad Popular del Ambiente “Fruto Vivas” UPAFV. Correo: drecologiaydhumanomb@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4499-4918>**