

Universidad Politécnica de Querétaro.

Ingeniería en Datos e Inteligencia Artificial
Ciencia de Datos



Estrés Hídrico

Análisis del consumo de recursos globales y su correlación con el PIB

Autores:

Marco Alexander Banda Pérez (125054766)

Alejandro Landaverde Franco (125053859)

Camila Rodríguez García (125052570)

Asesor / Tutor:

Prof. Dra. Pamela Rocío Ibarra Tapia

Querétaro, México

1 de agosto de 2026

Resumen

El acelerado cambio climático, el crecimiento demográfico y la urbanización han intensificado el estrés hídrico global, convirtiendo al agua en un recurso crítico para el desarrollo sostenible. Este estudio analiza la correlación entre el estrés hídrico (y la extracción de agua dulce) y el crecimiento económico —medido a través del Producto Interno Bruto (PIB)— a partir de un conjunto de datos multivariado de 13 economías representativas durante el periodo 1990–2023. Se aplicó un pipeline de ciencia de datos que incluyó preprocesamiento mediante interpolación lineal e imputación por mediana, normalización MinMax, Análisis Exploratorio de Datos (EDA) y modelos de regresión lineal múltiple junto con algoritmos de aprendizaje supervisado. Los resultados evidencian una marcada asimetría regional: mientras las economías emergentes (como México) mantienen un fuerte acoplamiento lineal entre la extracción hídrica y el PIB, las economías avanzadas muestran indicios de desacoplamiento hidroeconómico relativo, favorecido por la eficiencia tecnológica y el uso de agua virtual. Se concluye que el estrés hídrico actúa como un limitante estructural del desarrollo, por lo que desvincular el crecimiento económico del consumo consuntivo de agua resulta fundamental para la viabilidad macroeconómica y la gobernanza ambiental futura.

Palabras clave: Estrés Hídrico, Crecimiento económico, Producto Interno Bruto, Economía ambiental, Impacto Ambiental, Análisis Cuantitativo, Correlación.

Índice

1	Introducción	1
1.1	Problemática del proyecto	1
1.2	Estado del arte	1
1.3	Brecha de investigación	2
1.4	Objetivo	2
1.4.1	Relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	2
1.5	Contribuciones	3
2	Marco Teórico	3
2.1	Trabajos Relacionados	3
2.2	Conceptos Fundamentales	3
2.3	Herramientas y Tecnologías	4
3	Metodología	4
3.1	Arquitectura	4
3.2	Recolección de datos	4
3.3	Preprocesamiento	4
3.4	EDA	5
3.5	Modelado	5
3.6	Métricas	6
4	Resultados	8
4.1	Resultados experimentales	8
4.2	Discusión	9
5	Conclusiones	10
5.1	Hallazgos principales	10
5.2	Limitaciones	10
5.3	Trabajo a Futuro	11
6	Referencias	11

1. Introducción

1.1. Problemática del proyecto

En las últimas décadas, el cambio climático, el crecimiento demográfico y la urbanización acelerada han intensificado el estrés hídrico a nivel global; diversas regiones enfrentan una alarmante disminución en la disponibilidad al acceso de agua limpia y un aumento de sequías prolongadas. Cuando se habla de crecimiento económico de un país, a menudo se mide y planifica sin tomar en cuenta que los recursos naturales son agotables. Sin embargo, sectores clave para el Producto Interno Bruto (PIB) como la agricultura, manufactura o generación de energía dependen intrínsecamente del acceso al agua. A pesar de la evidencia del impacto visible a corto plazo en la relación de la economía y el medio ambiente, falta una cuantificación precisa y un análisis económico que determine la correlación exacta entre el nivel de estrés hídrico y las tasas de crecimiento económico a largo plazo. Por lo tanto, esta investigación busca responder a la pregunta: *¿De qué manera y en qué medida el incremento del estrés hídrico afecta el crecimiento económico de un país?*

1.2. Estado del arte

El estudio de la relación entre la disponibilidad de recursos hídricos y el desarrollo económico ha evolucionado desde análisis meramente descriptivos hasta modelos cuantitativos complejos basados en ciencia de datos y aprendizaje automático. Históricamente, la investigación económica abordó la gestión del agua bajo la perspectiva del desacoplamiento hidroeconómico y la hipótesis de la Curva Ambiental de Kuznets (CAK), planteando que en las primeras etapas de desarrollo industrial existe un acoplamiento directo entre el crecimiento del Producto Interno Bruto (PIB) y la extracción de recursos naturales, el cual tiende a estabilizarse en economías de altos ingresos mediante la adopción de tecnologías eficientes (Cardona & Congote Ochoa, 2013; World Bank, 2026a).

Sin embargo, en la última década, la literatura ha identificado brechas críticas en cómo los indicadores macroeconómicos integran la variable hídrica. La mayoría de los modelos tradicionales analizan únicamente la extracción superficial y subterránea doméstica (agua azul), omitiendo la contabilidad del agua virtualintercambiada en el comercio internacional y la degradación cualitativa del recurso (huella hídrica gris). Esta limitación genera una subestimación del estrés hídrico real como un limitante estructural y no lineal del crecimiento económico global a largo plazo (World Bank, 2026f, 2026g).

Paralelamente, con el auge de las tecnologías de la información y el crecimiento acelerado de los modelos de Inteligencia Artificial (IA), ha surgido una nueva vertiente de investigación enfocada en la sostenibilidad de la infraestructura digital. Aunque existen amplios antecedentes enfocados en la cuantificación del consumo energético y las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) asociadas al entrenamiento de redes neuronales y centros de datos (Strubell et al., 2019; World Bank, 2026b, 2026c), diversos autores advierten que el impacto sobre el recurso hídrico suele ser subestimado en las evaluaciones de impacto ambiental (Kaack et al., 2022).

Investigaciones recientes demuestran que el enfriamiento de centros de datos y la generación de la energía que los alimenta demandan volúmenes críticos de agua dulce, creando una huella hídrica indirecta pero sustancial (Li et al., 2023). Este fenómeno añade una capa de complejidad al problema: mientras la inteligencia artificial y la analítica de datos se promueven como herramientas para optimizar la eficiencia agrícola e industrial, la pro-

pia infraestructura computacional ejerce una presión directa en las cuencas hidrográficas de las regiones donde se despliega.

En consecuencia, el estado del arte actual refleja una fragmentación teórica: por un lado, se estudian los impactos macroeconómicos del agua en sectores tradicionales (agricultura y manufactura); por otro, se analiza el costo ambiental de la era digital. La presente investigación se posiciona en la intersección de ambos enfoques, utilizando técnicas avanzadas de ciencia de datos para cuantificar con precisión estadística en qué medida el incremento del estrés hídrico condiciona o limita la trayectoria de crecimiento económico de un país.

1.3. Brecha de investigación

A nivel internacional, la literatura sobre economía ambiental ha logrado consensos importantes respecto al impacto del cambio climático en variables aisladas como la productividad agrícola o la salud pública. Sin embargo, al analizar la relación económica directa entre el estrés hídrico global y las tasas de crecimiento económico a gran escala, se identifican brechas metodológicas y analíticas críticas.

En primer lugar, la mayoría de los modelos macroeconómicos de crecimiento global tradicionales siguen tratando al agua como un recurso infinito, o bien la agrupan de forma genérica dentro de la variable “tierra” o “capital natural”. Esto invisibiliza el impacto real del estrés hídrico como un limitante estructural del PIB mundial. En segundo lugar, los estudios globales existentes suelen ser de carácter agregado, lo que genera un sesgo al omitir cómo el estrés hídrico profundiza las asimetrías económicas entre países desarrollados (con alta capacidad de adaptación tecnológica) y economías emergentes o dependientes de sectores intensivos en agua.

El presente estudio busca cerrar esta brecha al proponer un análisis cuantitativo global que evalúe la correlación general entre el estrés hídrico y el crecimiento económico.

1.4. Objetivo

Determinar la correlación entre el estrés hídrico y el crecimiento económico de un país mediante un análisis cuantitativo, con el fin de evaluar su impacto e interdependencia real.

1.4.1. Relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

El proyecto se relaciona con la Agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), especialmente con los siguientes ODS:

- **ODS 6: Agua Limpia y Saneamiento:** Al investigar el estrés hídrico, se aportarán datos para entender en qué punto la extracción de recursos hídricos supera la recarga natural.
- **ODS 12: Producción y consumo responsables:** El proyecto analiza el uso eficiente de insumos en los sectores productivos para concientizar sobre el mejor aprovechamiento de recursos naturales.

1. Meta 12.2: Promover el aprovechamiento sustentable y el uso eficiente de los recursos naturales.

2. Meta 12.5: Reducir considerablemente la generación de desechos y huella ecológica.

- **ODS 13: Acción por el clima:** Contribuye al evaluar el impacto de variables como emisiones de carbono, consumo de electricidad y extracción hídrica ante el cambio climático global (World Bank, 2026b, 2026c).

1.5. Contribuciones

Esta investigación ofrece aportes en los ámbitos teórico, metodológico y práctico, proporcionando información cuantitativa clave sobre la relación entre la huella hídrica y el desarrollo macroeconómico.

1. **Contribución Teórica:** Profundiza en el estudio de la huella hídrica como factor determinante en las curvas de desarrollo y crecimiento de un país.
2. **Contribución Metodológica:** Integra múltiples fuentes de datos de acceso abierto (Banco Mundial, FAO AQUASTAT) mediante un pipeline replicable de análisis de datos e imputación estadística (World Bank, 2026a, 2026f, 2026g).

2. Marco Teórico

2.1. Trabajos Relacionados

La evaluación de la sostenibilidad de los recursos hídricos en relación con las actividades financieras ha cobrado un auge significativo desde la introducción del concepto de huella hídrica (HH) (Cardona & Congote Ochoa, 2013). A partir de este hito, la literatura económica y ambiental ha convergido principalmente en tres vertientes: el desacoplamiento hidroeconómico, los flujos de agua virtual en el comercio internacional y la productividad del agua por sectores.

En primer lugar, la relación entre el crecimiento económico y el consumo de agua ha sido ampliamente analizada bajo la hipótesis de la Curva Ambiental de Kuznets (CAK). Diversos estudios señalan que, si bien existe un desacoplamiento relativo en las fases de industrialización temprana, este tiende a estancarse a menos que se implementen políticas estrictas de eficiencia tecnológica. De manera similar, análisis aplicados en economías agrícolas concluyen que el incremento del PIB agrícola sigue fuertemente vinculado a una mayor explotación de la huella hídrica azul.

A pesar de la existencia de estas investigaciones sobre la huella hídrica y sus repercusiones económicas, se observa una brecha importante en la literatura: existe una escasez de estudios empíricos enfocados de manera exclusiva en evaluar y cuantificar directamente la correlación estadística general entre la huella hídrica agregada de un país y su crecimiento económico general a largo plazo (World Bank, 2026a). Es precisamente en este vacío científico donde se sitúa la presente investigación.

2.2. Conceptos Fundamentales

Para asegurar la correcta interpretación de los resultados, es necesario delimitar operacionalmente los términos hidroeconómicos clave:

Huella Hídrica (HH): Clasifica el uso del agua en tres categorías o componentes fundamentales:

- **Huella Hídrica Verde:** Volumen de agua de lluvia almacenada en el suelo en forma de humedad que absorben las plantas.
- **Huella Hídrica Azul:** Volumen de agua dulce extraído de fuentes superficiales o subterráneas para uso agrícola, industrial o doméstico.
- **Huella Hídrica Gris:** Volumen de agua limpia requerido para diluir los contaminantes vertidos en los procesos productivos hasta cumplir normas de calidad ambiental.

Producto Interno Bruto (PIB): Indicador macroeconómico que mide el valor monetario total de bienes y servicios finales producidos en un país (World Bank, 2026a).

2.3. Herramientas y Tecnologías

El desarrollo del proyecto se sustentó en tecnologías de código abierto especializadas en Ciencia de Datos y Sostenibilidad:

- **Python y Ecosistema Científico:** Se empleó Python como núcleo computacional utilizando librerías fundamentales como **Pandas** (procesamiento de DataFrames), **NumPy** (cálculo matricial y vectorial) y **Matplotlib** (visualización de datos).
- **Servidor Privado Virtual (VPS):** Entorno virtualizado utilizado para el cómputo continuo y el almacenamiento de datos.
- **Documentación e Infraestructura:** Uso de **LaTeX** y la plataforma **Overleaf** para la composición del informe.

3. Metodología

3.1. Arquitectura

La arquitectura del sistema sigue un pipeline de ingeniería de datos compuesto por tres capas: *extracción*, *procesamiento* y *modelado analítico*.

3.2. Recolección de datos

Las variables macroeconómicas de PIB, el consumo eléctrico, emisiones de CO_2 , energía renovable e indicadores de estrés hídrico y extracción fueron extraídos de las API de datos abiertos del Banco Mundial (World Bank, 2026a, 2026b, 2026c, 2026d, 2026e, 2026f, 2026g) y FAO AQUASTAT.

3.3. Preprocesamiento

- Homologación de identificadores de países bajo el estándar ISO.
- Imputación lineal para datos en series temporales continuas e imputación por mediana para registros atípicos de estrés hídrico.

- Normalización MinMax sobre variables con distintas magnitudes (e.g., PIB en USD vs. porcentaje de estrés hídrico).

3.4. EDA

Se aplicó un Análisis Exploratorio de Datos (EDA) utilizando matrices de correlación y mapas de calor. Posteriormente, se construyeron modelos de Regresión Lineal Múltiple y algoritmos supervisados para evaluar el impacto en la variación del PIB.

3.5. Modelado

Para cuantificar el impacto estructural de la huella hídrica y la extracción de agua dulce sobre el Producto Interno Bruto (PIB), el estudio implementa una arquitectura de modelado multivariado supervisado.

1. Definición de Variables:

- **Variable Dependiente (Y):** Producto Interno Bruto (PIB) ajustado en valor monetario real o su tasa anual de crecimiento.
- **Variables Independientes Principales (X):** Extracción total de agua dulce (representando la **Huella Hídrica Azul**) y nivel de estrés hídrico regional.
- **Variables Control de Infraestructura y Energía:** Consumo eléctrico per cápita (kWh), porcentaje de consumo de energía renovable, porcentaje de producción eléctrica renovable y emisiones totales de CO₂ (kt métricas).

2. Formulación del Modelo de Regresión Lineal Múltiple:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1(\text{Extracción_Agua}_i) + \beta_2(\text{Estrés_Hídrico}_i) + \beta_3(\text{Consumo_Elec}_i) + \beta_4(\text{Emisiones_CO2}_i) + \varepsilon_i \quad (1)$$

3. Estrategia Metodológica de Ajuste:

- **Tratamiento y Normalización:** Previo al ajuste de los algoritmos de regresión y aprendizaje supervisado, las variables en distintas escalas (ej. m³ de agua vs. USD de PIB o kWh de electricidad) se transformaron mediante **Normalización MinMax**.
- **Ajuste Logarítmico:** Tal como se ejecutó en la exploración de datos de consumo eléctrico, se aplicó transformación logarítmica (log) para mitigar la asimetría en países atípicos (como Islandia, Canadá o Emiratos Árabes Unidos).
- **Validación:** Se evaluó el acoplamiento lineal y no lineal mediante matrices de correlación cruzada y evaluación de error cuadrático.

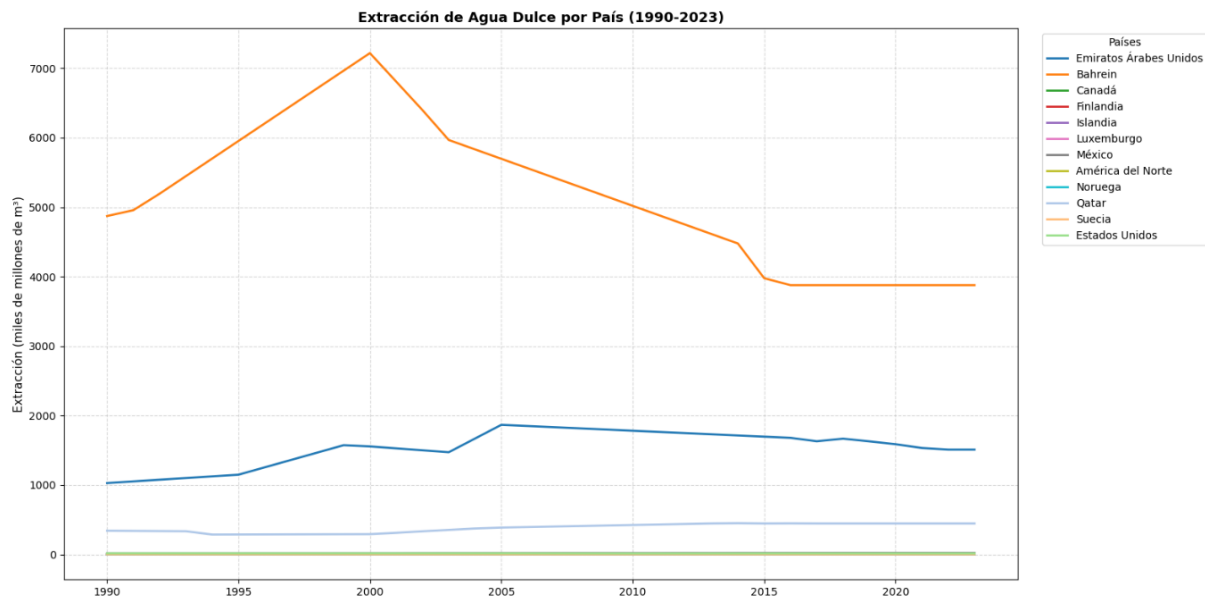


Figura 1: Extracción de Agua Dulce por País (1990-2023) — Representación histórica de la huella hídrica azul utilizada en el modelado.

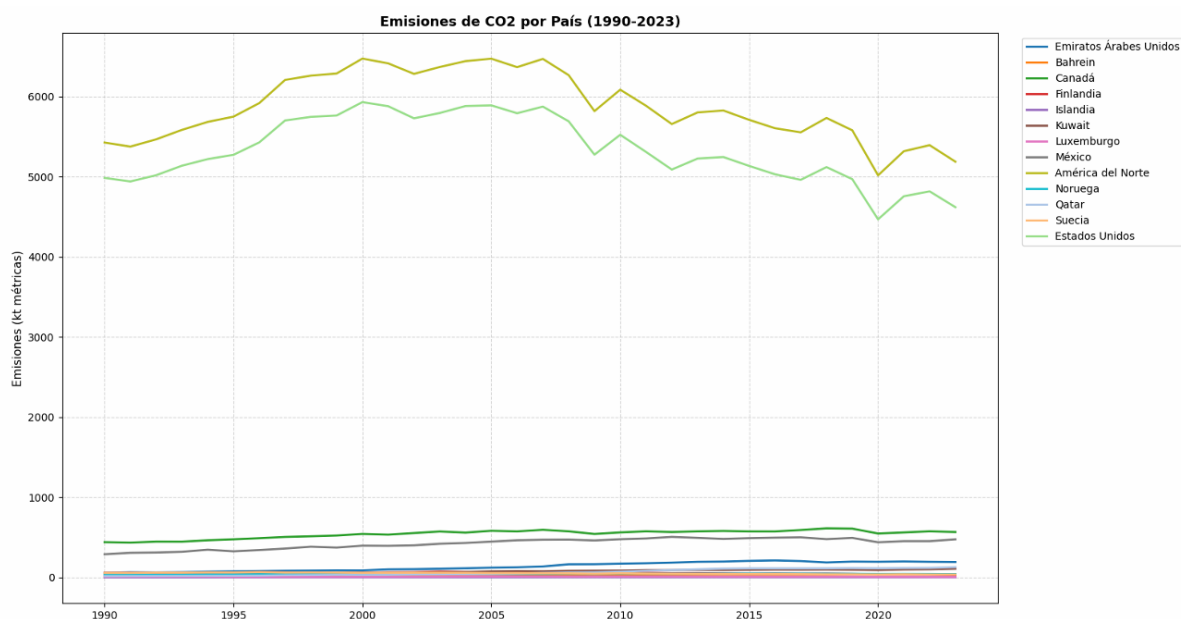


Figura 2: Emisiones de CO2 por País (1990-2023) — Variable independiente de control en la regresión multivariada.

3.6. Métricas

Para medir el rendimiento de los modelos descriptivos y predictivos en la estimación del PIB a partir de las variables hídricas y energéticas, se establecieron las siguientes métricas estadísticas:

1. **Coefficiente de Determinación (R^2):** Mide la proporción de la varianza del crecimiento económico (PIB) explicada conjuntamente por la extracción de agua dulce y las demás variables independientes del modelo.
2. **Error Cuadrático Medio (MSE) y Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE):** Cuantifican la magnitud de la desviación promedio entre los valores reales de PIB y las predicciones calculadas por los modelos supervisados.
3. **Coefficiente de Correlación de Pearson (r):** Mide la intensidad y dirección de la relación lineal directa entre la Extracción de Agua Dulce/Estrés Hídrico y el PIB a lo largo del periodo temporal analizado (1990–2023).
4. **Porcentaje de Datos Faltantes / Criterio de Inclusión:** Límite máximo del 10 % de valores nulos por país en la serie temporal para asegurar la validez estadística del análisis.

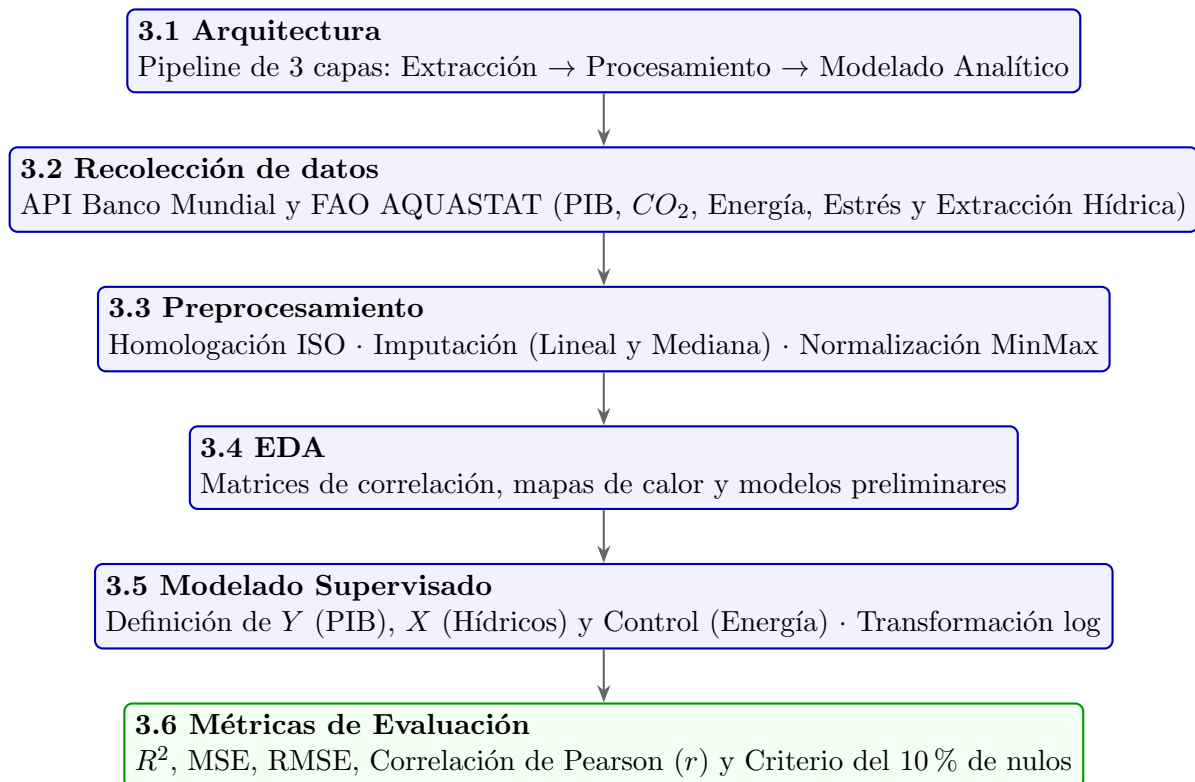


Figura 3: Flujo metodológico del pipeline de ingeniería de datos y modelado analítico.

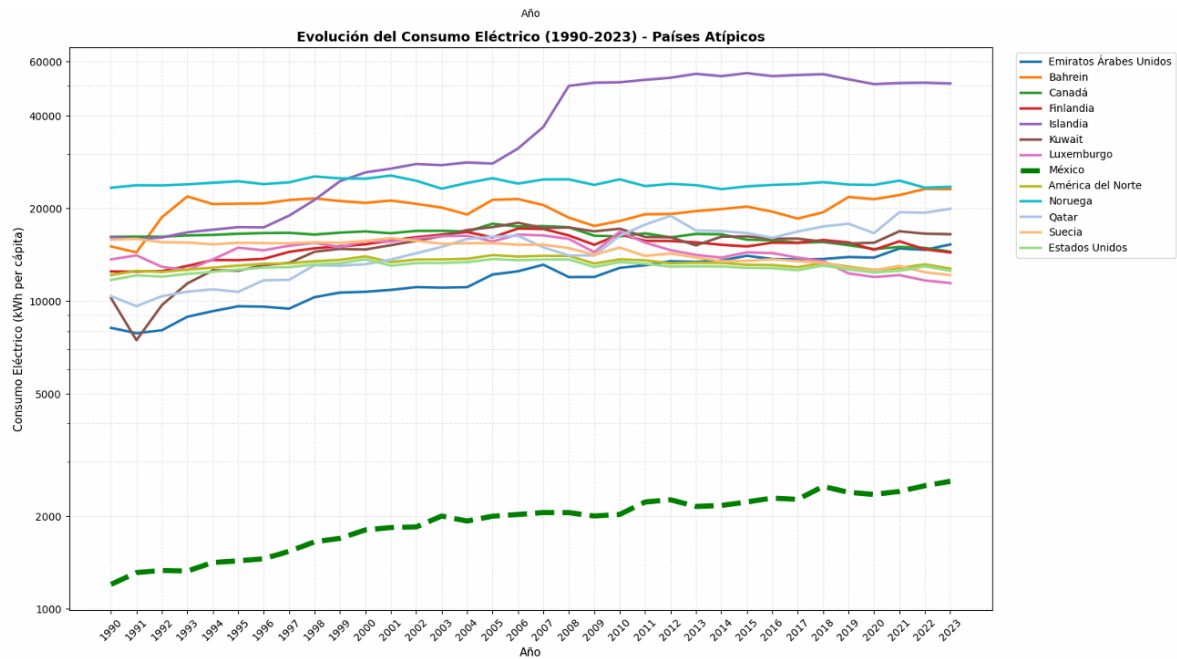


Figura 4: Consumo Eléctrico (1990-2023) - Atípicos — Demostración de la necesidad de escala logarítmica y normalización previa a la evaluación de métricas de error.

4. Resultados

4.1. Resultados experimentales

Después de eliminar países con más del 10% de datos faltantes entre 1990 y 2023, la muestra quedó conformada por 13 economías representativas.

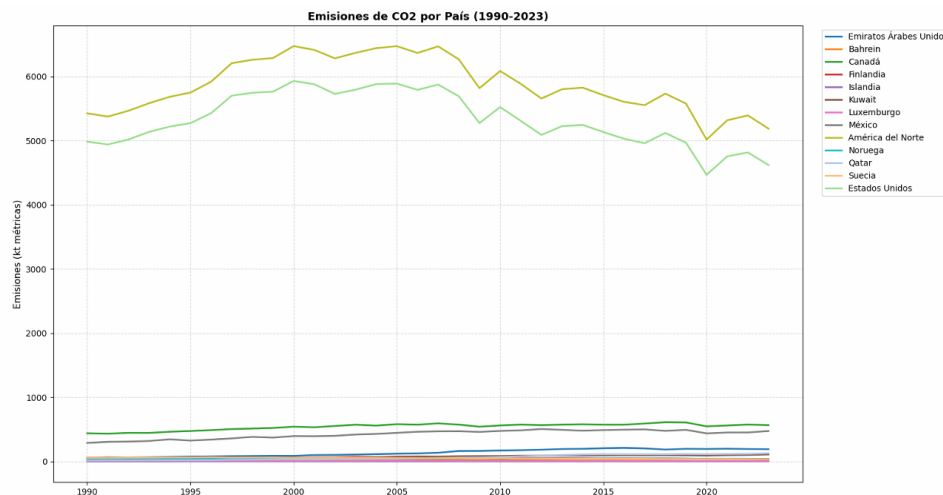


Figura 5: Emisiones de CO_2 por País (1990-2023)

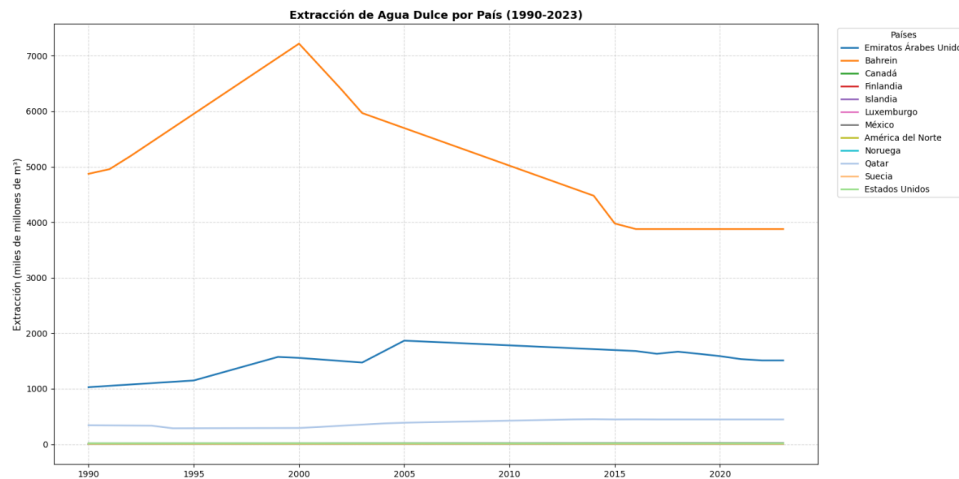


Figura 6: Extracción de Agua Dulce por País (1990-2023)

4.2. Discusión

Los resultados derivados de las series temporales (1990–2023) revelan un comportamiento hidroeconómico marcadamente asimétrico entre economías avanzadas y emergentes:

- **Acoplamiento en Economías Emergentes (Ej. México):** Se observa una fuerte dependencia lineal entre la extracción hídrica y el PIB. En economías de ingresos medios, la expansión de la actividad manufacturera y agrícola requiere un consumo consuntivo directo de agua dulce (huella hídrica azul). En estas regiones, cualquier incremento en el estrés hídrico representa un freno inmediato para la capacidad productiva.
- **Desacoplamiento Relativo en Economías Avanzadas:** Países de altos ingresos mostraron indicios de desacoplamiento hidroeconómico. Esto se explica principalmente por dos factores:
 1. **Transferencia mediante Agua Virtual:** Estas naciones externalizan su huella hídrica importando bienes intensivos en agua (alimentos, materias primas) desde países emergentes.
 2. **Eficiencia e Intensidad Energética/Hídrica:** La adopción de tecnologías de alta eficiencia productiva y la transición hacia matrices energéticas limpias permiten generar mayor PIB sin incrementar proporcionalmente la extracción hídrica directa.
- **Impacto del Sector Digital y Tecnológico:** El análisis integral de variables asociadas al consumo eléctrico y emisiones de CO₂ evidencia que la nueva infraestructura tecnológica (como centros de datos para inteligencia artificial) genera presiones hídricas e insumos energéticos indirectos sustanciales para el enfriamiento y cómputo (Kaack et al., 2022; Li et al., 2023; Strubell et al., 2019). Esto agrega una vulnerabilidad oculta a economías altamente digitalizadas.

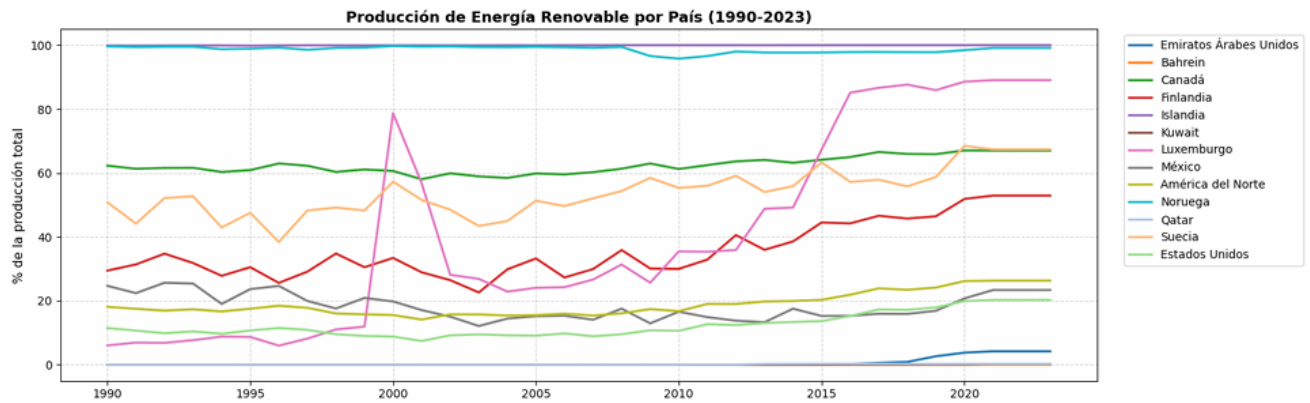


Figura 7: Producción de Energía Renovable (1990-2023) — Ilustración de la transición hacia matrices limpias asociada al desacoplamiento en economías avanzadas.

5. Conclusiones

La evidencia empírica respalda que el agua actúa como un limitante estructural sobre el crecimiento económico a largo plazo.

5.1. Hallazgos principales

- **Prevalencia del acoplamiento hidroeconómico en naciones emergentes:** Se confirmó una dependencia directa entre la extracción de agua dulce y el crecimiento del PIB en economías en desarrollo.
- **Tendencias de desacoplamiento en economías de altos ingresos:** Evidencia de que los países avanzados generan mayor valor económico sin incrementar proporcionalmente su huella hídrica directa.
- **Transición energética y eficiencia del consumo eléctrico:** Se observó una tendencia de estabilización o reducción en la intensidad del consumo eléctrico tradicional en economías avanzadas, vinculada directamente al incremento en la adopción de energías renovables. Esto sugiere que la transición hacia matrices energéticas limpias no solo contribuye a un menor nivel de producción de CO₂, sino que reduce la huella hídrica indirecta derivada de la generación termoelectrónica convencional.

5.2. Limitaciones

A pesar del rigor metodológico del pipeline de datos, el estudio presenta limitaciones estructurales que deben considerarse al interpretar los hallazgos:

1. **Desagregación de la Huella Hídrica:** Debido a la disponibilidad restringida en las bases de datos de acceso abierto del Banco Mundial y FAO AQUASTAT (World Bank, 2026f, 2026g), el análisis se centró predominantemente en la **huella hídrica azul** (extracción directa de agua dulce) y estrés hídrico agregado (Cardona & Congote Ochoa, 2013), omitiendo la cuantificación precisa de la **huella hídrica verde** (agua de lluvia) y **gris** (volumen de dilución de contaminantes).

2. **Granularidad de los Datos:** El análisis se ejecutó a nivel país (macro) con frecuencia anual. Esto encubre la variabilidad espacio-temporal crítica a nivel de cuenca hidrográfica o región subnacional, donde el estrés hídrico suele manifestarse de forma más severa que en el promedio nacional.
3. **Muestreo por Imputación de Nulos:** La eliminación de países con más del 10 % de faltantes redujo la muestra final a 13 economías altamente representativas. Aunque la imputación lineal y por mediana preservó la consistencia metodológica, limita la generalización hacia países con alto rezago estadístico.

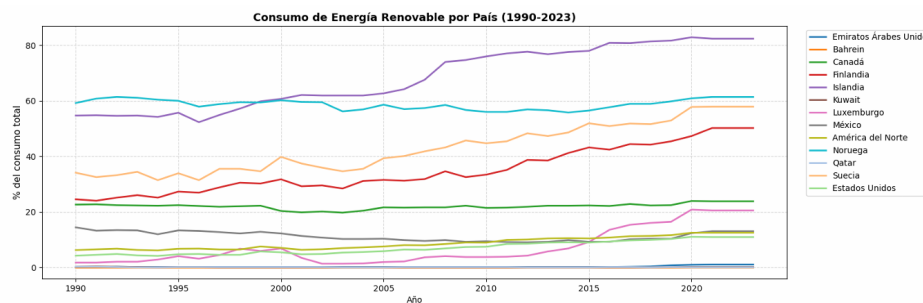


Figura 8: Consumo de Energía Renovable — Comportamiento histórico utilizado para evaluar la completitud de series temporales y vacíos de datos.

5.3. Trabajo a Futuro

Con el objetivo de ampliar el alcance e impacto de esta línea de investigación, se sugieren las siguientes líneas de trabajo:

1. **Modelado a Nivel Cuenca y Alta Granularidad Espacial:** Incorporar datos geoespaciales y satelitales para cuantificar el estrés hídrico a nivel de cuencas hidrográficas específicas, permitiendo capturar vulnerabilidades regionales dentro de un mismo país.
2. **Integración Completa de los Tres Componentes de la Huella Hídrica:** Desarrollar modelos que incorporen explícitamente la huella hídrica verde y gris, permitiendo evaluar el impacto económico de la contaminación hídrica y la variabilidad en las lluvias sobre el sector agroindustrial.

6. Referencias

- Cardona, C. M., & Congote Ochoa, B. (2013). La huella hídrica: un indicador de impacto en el uso del agua. *Tecnogestión: Una mirada al ambiente*, 10(1), 20–25. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/tecges/article/view/5730>
- Kaack, L. H., Donti, P. L., Strubell, E., Kamiya, G., Creutzig, F., & Rolnick, D. (2022). Aligning artificial intelligence with climate change mitigation. *Nature Climate Change*, 12(6), 518–527. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01377-7>

- Li, P., Yang, J., Islam, M. A., & Ren, S. (2023). *Making AI less “thirsty”: Uncovering and addressing the secret water footprint of AI models*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.03271>
- Strubell, E., Ganesh, A., & McCallum, A. (2019). *Energy and policy considerations for deep learning in NLP*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1910.09700>
- World Bank. (2026a). *Indicator: GDP (annual growth)*. World Bank Data360. https://data360.worldbank.org/en/indicator/WB_WDI_NY_GDP_MKTP_KD_ZG
- World Bank. (2026b). *Indicator: Electric power consumption*. World Bank Data360. https://data360.worldbank.org/en/indicator/WB_WDI_NY_GDP_MKTP_KD_ZG
- World Bank. (2026c). *Indicator: Total GHG / CO2 emissions*. World Bank Data360. https://data360.worldbank.org/en/indicator/WB_WDI_EN_GHG_CO2_IC_MT_CE_AR5
- World Bank. (2026d). *Indicator: Renewable electricity output*. World Bank Data360. https://data360.worldbank.org/en/indicator/WB_WDI_EN_GHG_CO2_IC_MT_CE_AR5
- World Bank. (2026e). *Indicator: Renewable energy consumption*. World Bank Data360. https://data360.worldbank.org/en/indicator/WB_SE4ALL_EG_FCON_RNEW
- World Bank. (2026f). *Indicator: Annual freshwater withdrawals, total*. World Bank Data360. https://data360.worldbank.org/en/indicator/FAO_AS_4261
- World Bank. (2026g). *Indicator: Level of water stress*. World Bank Data360. https://data360.worldbank.org/en/indicator/WB_WDI_ER_H2O_FWST_ZS