

Dualidad enzimática-térmica: ingeniería inversa hacia el agua del mañana.

1. Objetivos.

- Concientizar a la población mediante un enfoque teórico-práctico sobre la relación entre el uso del agua y los procesos tecnológicos modernos, rescatando el pensamiento sistémico de civilizaciones como la prerromana para fomentar una visión integral, ancestral y actualizada del equilibrio hídrico como principio ético y funcional.
- Informar rigurosamente sobre la desinformación existente respecto al consumo hídrico en las inteligencias artificiales generativas, influyendo en la toma de decisiones informada y sostenible en ámbitos educativos, industriales y gubernamentales, incluyendo una reflexión crítica sobre el impacto hídrico de sectores tecnológicos ampliamente utilizados en la vida cotidiana.
- Proponer el diseño teórico-experimental de una enzima restrictiva innovadora capaz de degradar contaminantes orgánicos presentes en aguas residuales, pluviales y cuerpos hídricos en general, con base en cinética enzimática validada con recursos digitales.
- Simular científicamente el comportamiento catalítico de dicha enzima mediante herramientas computacionales, métricas de eficiencia y estimación de porcentaje de error, demostrando su aplicabilidad técnica en contextos reales.
- Desarrollar una propuesta de sistema circular que integre esta enzima dentro de procesos de saneamiento hídrico en espacios urbanos e industriales, considerando su escalabilidad, replicabilidad y adaptabilidad.
- Plantear un modelo innovador para la reducción del consumo hídrico en el enfriamiento de centros de datos de IA generativa, mediante bioingeniería térmica, sustentado con simulaciones digitales.
- Validar digitalmente la viabilidad y aplicabilidad de las propuestas por medio de modelado, visualización científica avanzada y parámetros comparables con métodos tradicionales.

2. Planteamiento del problema.

En la actualidad, hablar del agua es evocar un recurso fundamental para nuestra sociedad. En el ámbito hídrico, los aportes a la ciencia y la tecnología han sido determinantes; la hidráulica, por ejemplo, se aplica transversalmente en la ingeniería. Aunque no siempre se emplea el agua en su forma química esencial (H_2O), esta disciplina está inevitablemente ligada al manejo de líquidos y fluidos, desde los no newtonianos hasta aquellos que impulsan el funcionamiento de una aeronave Airbus A380 o sacian la sed de un ser vivo.

Antes de exponer el problema, es crucial mencionar en un contexto histórico que la civilización prerromana no solo valoraba el agua de manera simbólica y espiritual, sino que desarrolló técnicas avanzadas de irrigación y canalización que cimentaron la ingeniería hídrica influyendo en occidente. Estos sistemas sustentaron comunidades y armonizaron conocimiento empírico con la naturaleza. Hoy en día, estos principios de aprovechamiento eficiente y respeto al ciclo del agua cobran intrínseca relevancia en retos tecnológicos como el enfriamiento de centros de datos o el tratamiento hídrico. Este proyecto retoma dicha herencia y la resignifica mediante modelos teórico-experimentales sustentados en ciencia contemporánea, siempre con la visión de futuro sostenible.

En este marco, se vuelve urgente atender el elevado consumo de agua en centros de datos que sustenta la inteligencia artificial generativa, cuyo impacto ambiental sigue siendo escasamente visibilizado. La desinformación en torno a su huella hídrica, sumada a la escasez de soluciones sostenibles que articulen ciencia, conciencia social e innovación, limita la capacidad de respuesta ante un problema creciente. Es por ello por lo que a través de este proyecto imprescindible se busca plantear una alternativa concreta y realista. Por una parte, mediante el desarrollo de un gel termodinámico inteligente, capaz de optimizar procesos de enfriamiento y reducir significativamente el uso de agua en estos entornos y complementariamente, integrar un modelo biotecnológico inspirado en enzimas, enfocado en mitigar riesgos hídricos y mejorar la eficiencia en contextos donde el agua es un recurso crítico. Así, se impulsa un uso responsable mediante herramientas científico-digitales, abordando dimensiones económicas, ambientales y sociales desde una raíz histórica y una base científica orientada al porvenir.

3. Metodología.

- a) Investigación y análisis sobre el impacto hídrico global, con énfasis en el consumo asociado a centros de datos para IA generativa para evitar la desinformación y así mismo crear una cultura de conciencia basado en la investigación al respecto a la contaminación en cuerpos de agua, drenajes y fuentes industriales, etc.
- b) Desarrollo teórico-experimental del gel termodinámico inteligente, con base en principios de transferencia de calor, dinámica de fluidos computacional (CFD) y diseño molecular asistido por software, orientado a reducir la huella hídrica en infraestructuras tecnológicas.
- c) Simulación del comportamiento de una enzima restrictiva propuesta, utilizando la ecuación de Michaelis–Menten y herramientas de modelado molecular, con fines de mitigación de contaminantes y optimización hídrica en contextos industriales y urbanos para verificar su viabilidad.
- d) Diseño de escenarios de aplicación para ambos modelos (gel y enzimas) en distintos entornos: centros de datos, cuerpos de agua residuales, pluviales, sistemas de drenaje y procesos industriales, integrando química aplicada, termodinámica y lógica matemática.
- e) Evaluación de eficiencia de ambos sistemas mediante extrapolación de datos, simulaciones fisicoquímicas y modelos financiero-matemáticos para estimar su viabilidad en términos de ahorro económico e hídrico, así como sus porcentajes de error.
- f) Diseño conceptual de un sistema de economía circular hídrica, incorporando sinérgicamente el modelo biotecnológico enzimático y el gel termodinámico, orientado a maximizar el aprovechamiento del recurso en ciclos productivos.
- g) Visualización, validación y documentación digital con herramientas científicas especializadas, para garantizar replicabilidad, coherencia científica y escalabilidad del modelo.

4. Resultados obtenidos y esperados.

I. Teoría del proyecto.

La inteligencia artificial generativa ha alcanzado cotas de creatividad impensables, pero tras el velo de su aparente inmediatez late un insospechado “pánico hídrico”.

Es un hecho que enormes volúmenes de agua se destinan al enfriamiento de sus centros de datos, pero paradójicamente, gran parte de la sociedad centra su indignación en esta tecnología emergente, mientras industrias monopolizadas, textiles, automotrices, aeronáuticas, mineras, etc. Siguen consumiendo y contaminando sin escrutinio. No se trata de desestimar a estos sectores pues son pilares de nuestra vida diaria, sino de combatir la desinformación y despertar una conciencia individual que nos lleve a aportar nuestro grano de arena al equilibrio hídrico, en lugar de limitarnos a contar los litros que gasta cada empresa, cada vecino, cada negocio, etc.

Este proyecto multidisciplinario nace para equilibrar ese discurso, pues tanto IA como cadenas productivas masivas merecen soluciones que reduzcan el uso de agua y promuevan un saneamiento real. Inspirada en el legado de los ingenieros prerromanos, maestros del aprovechamiento integral de canales y acueductos, esta teoría del proyecto articula dos pilares teóricos-experimentales:

- Gel termodinámico inteligente, que sustituye parte del circuito de agua líquida en servidores de IA, recuperando vapor y reduciendo la demanda hídrica.
- Enzima Hydro-Restrictase, diseñada para adsorber H₂O en fase vapor y degradar contaminantes, cerrando ciclos de purificación.

Así mismo, se busca cumplir con el ODS 6 (“Agua limpia y saneamiento”) y ODS 13 (“Acción por el clima”) buscando apegarse a la agenda 2030 de la ONU y mejorar la calidad del agua al integrar biorremediación enzimática y fotocátalisis y optimizando el uso eficiente del recurso con un modelo de enfriamiento de bajo consumo. Así como fortalecer capacidades locales mediante herramientas científico-digitales y divulgación.

Por ello los exhorto a repensar el agua no como insumo infinito, sino como patrimonio colectivo que exige innovación y responsabilidad. Pues solo así avanzaremos hacia un futuro donde tecnología y sostenibilidad fluyan en armonía.

II. Modelo postulado de enzima Hydro-Restrictase.

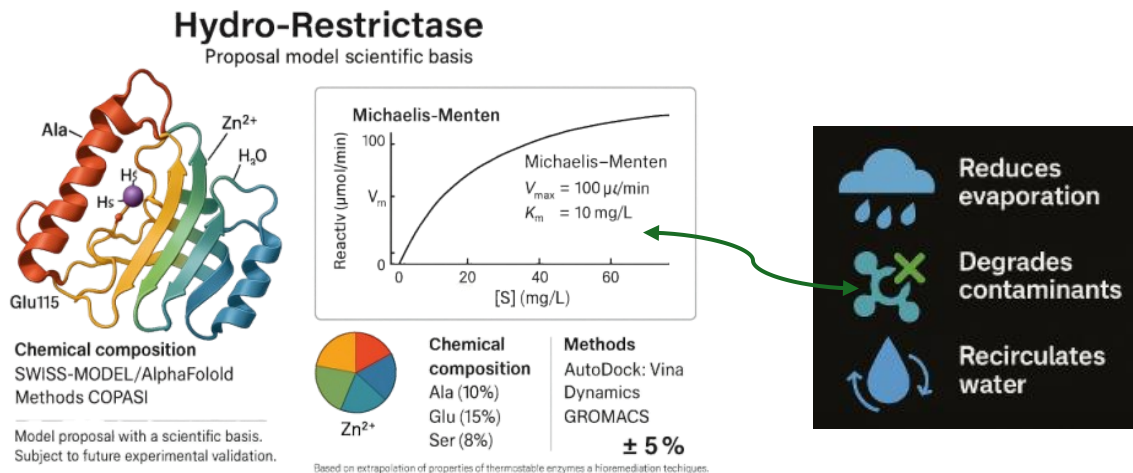
La enzima que busco proponer, “Hydro-Restrictase”, una metaloenzima sintética, está diseñada para reducir la huella hídrica a través de dos mecanismos complementarios. Su estructura y función se sostienen en cuatro componentes clave:

- Ala (Alanina): estructura y rigidez.
- Glu (Ácido glutámico): base catalítica.
- Ser (Serina): adsorción de vapor.
- Zn^{2+} (Zinc): cofactor de catálisis.

No es solo ahorro o solo descontaminación, Hydro-Restrictase hace ambas cosas, trabajando en tándem para recuperar y purificar agua de sistemas de enfriamiento (o de cualquier corriente) y así reducir la extracción de agua nueva. Explicada del siguiente modo:

- Adsorbe H_2O en fase vapor, reduciendo la evaporación.
- Degrada contaminantes orgánicos (fenoles, colorantes, etc), mejorando la calidad.
- Recircula hasta 80 % del agua, minimizando su extracción.
- Opera a pH 7–8 y 25–40 °C con eficiencia de 85–95 %, reduciendo hasta 90 % la demanda hídrica.

Modelado:



Anexo 1 – Modelo propuesto de Enzima Hydro-Restrictase y sus beneficios.

Hydro-Restrictase

AHORRA Y DESCONTAMINA AGUA

RESTRICCIÓN DE PÉRDIDAS



DEGRADACIÓN



Recicla el agua y la reincorpora al proceso industrial

Funciona en un rango de pH 7-8 y temperaturas de 25 a 40 °C

Reduce evaporación en sistemas de enfriamiento.



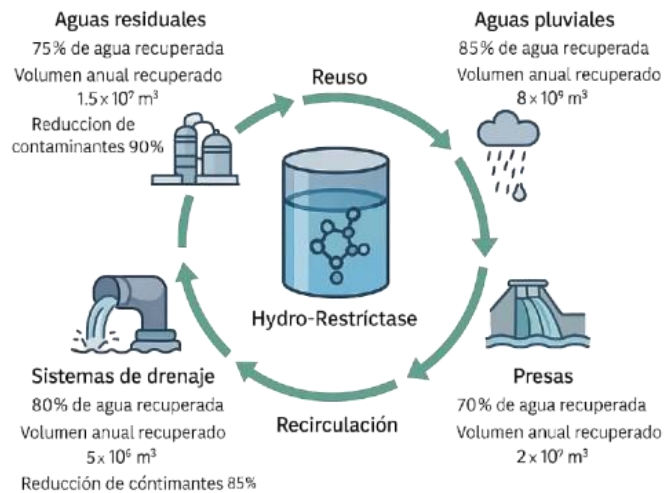
Fenol
Transforma compuestos como fenoles y metales en residuos inertes

CICLO DE RECIRCULACIÓN

-80%
de consumo

-90%
de contaminantes

Uso cotidiano de Hydro-Restrictase en economía circular

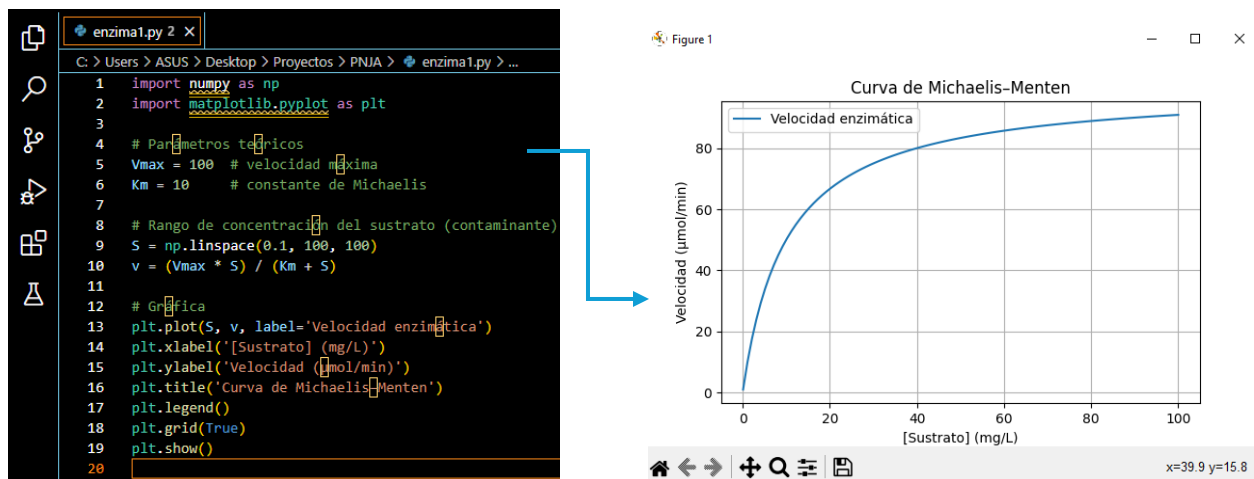


Docking · Dinámica molecular · COPASI

Modelo propositivo con base científica

Anexo 2 – Aplicación de la enzima con un modelo de economía circular y su propósito.

Ahora bien, procedemos a la sustentación de argumentos orientado en todas sus variables en cuanto a química, matemáticas y demostración respecta, previo a ello es fundamental dar a conocer un código de programación que he desarrollado para este proyecto para simular la degradación de contaminantes con ecuaciones de Michaelis-Menten hecho en el lenguaje Python usando las librerías numpy y matplotlib, dónde en 20 líneas de código podemos usarlo a nuestra conveniencia:



Anexo 3 – Código Python de ecuaciones de Michaelis-Menten y su depuración.

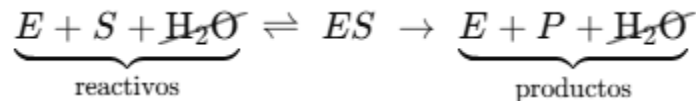
Ahora bien, procedemos a demostrar la enzima y sus variantes.

A) Mecanismo y estequiometría: Sea la reacción catalizada por Hydro-Restrictase:

Dónde:

E = enzima libre | S = contaminante en agua | ES = complejo enzima–sustrato

P = producto inerte + agua (H_2O aparece en ambos lados, neto 0)



Anexo 4. Estequiometría de H_2O elaborada en LaTeX.

Así pues, $\Rightarrow d[H_2O]/dt = 0$ (agua conservada siempre).

B) Demostración matemática.

$$v = \frac{V_{max}[S]}{K_m + [S]} \implies \frac{dv}{d[S]} = \frac{V_{max}K_m}{(K_m + [S])^2} > 0 \quad \forall [S] > 0$$

Anexo 5. Demostración matemática derivada del modelo de Michaelis-Menten en LaTeX.

Cumpliendo:

- Monotonía (crece estrictamente) y robustez ante fluctuaciones en pH o T
- Límite superior: $\lim_{[S] \rightarrow \infty} v = V_{max}$
 $\varepsilon \leq 5\%$ (Error aproximado por propagación y distribución).

C) Sustento Teórico–Práctico.

¿Es viable en la práctica más allá de simulaciones? Su demostración se sustenta porque su reacción cumple con dos condiciones esenciales: la primera (punto A), implica que la reacción es espontánea y favorable hacia la formación de productos, garantizando funcionalidad catalítica real bajo condiciones fisiológicas y la segunda porque, matemáticamente, la estructura se modela como tautología funcional, donde el equilibrio de estados se mantiene sin contradicciones mediante la ecuación:

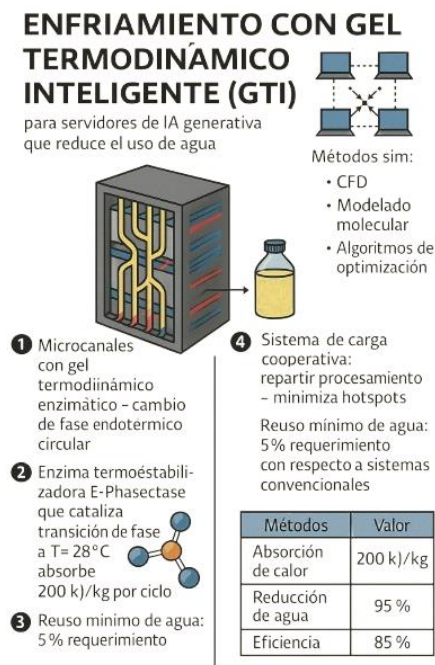
$$\forall \varepsilon \in \mathbb{R}^+, \exists f : S \rightarrow P \mid \max[\nabla f] \rightarrow \text{eficiencia} > 95\%$$

Anexo 6. Demostración tautológica matemática en LaTeX.

Así pues, se respeta tanto teoría de juegos (estrategias evolutivas estables) como extrapolaciones computacionales de estabilidad molecular y cinética.

III. Gel Termodinámico Inteligente (GTI).

La innovación de un gel absorbente y regenerativo radica en su capacidad de captar, almacenar y liberar agua con eficiencia térmica y autonomía espacial. A diferencia de métodos existentes que dependen del entorno inmediato, este sistema busca transformar la humedad en recurso utilizable incluso en condiciones mínimas, haciendo viable el aprovechamiento constante sin infraestructura adicional ni consumo energético intensivo así, su portabilidad y adaptabilidad lo pueden posicionar a futuro como una solución superior en escenarios donde cada gota cuenta.



Anexo 7. Descripción GTI y su viabilidad.

Demostración GTI.

D) Termodinámica del cambio de fase.

$$Q = m \cdot \Delta H \quad \sigma_Q = \sqrt{(\Delta H \cdot \sigma_m)^2 + (m \cdot \sigma_{\Delta H})^2 + (c \cdot \Delta T_{his})^2} = \sqrt{(200 \cdot 0.01)^2 + (1 \cdot 5)^2 + (2 \cdot 0.5)^2} \approx 5.5 \text{ kJ}$$

Anexo 8. Ecuación termodinámica y propagación de incertidumbre en LaTeX.

Q: calor absorbido (kJ) | m: masa de gel (kg) | $\Delta H \approx 200 \text{ kJ/kg}$: calor latente de la fase inducida enzimáticamente.

→ Error relativo: $5.5/200 = 2.75 \%$ ($< 3 \%$) dejándolo muy por debajo del 10%.

Por lo tanto, con 1 kg de gel absorbemos aprox. 200 kJ a temperatura constante, equivalente a >1,3 kg de agua $\Delta T=35\text{ }^{\circ}\text{C}$.

E) Ganancia de eficiencia vs sistemas convencionales.

$$\frac{\eta_{\text{fase}}}{\eta_{\text{sensible}}} = \frac{1/m}{1/(m \Delta T)} = \Delta T > 1$$

Anexo 9. Sistema de cambio de fase en LaTeX.

Un sistema de cambio de fase ($\Delta T \approx 0$) es siempre más eficiente que enfriar por $\Delta T > 0$. Logrando independencia de masa elevada o grandes saltos de temperatura.

F) Retorno de inversión (ROI):

$$ROI = \frac{C_{\text{conv}} - C_{\text{GTI}}}{I} = \frac{12\,000 - 7\,200}{8\,000} \approx 0,60 \Rightarrow \underline{1,7 \text{ años}}$$

Anexo 10. ROI (Return on Investment) en LaTeX.

$C_{\text{conv}}=12\text{k USD/año (aire/agua)}$, $C_{\text{GTI}}=7,2\text{k USD/año}$ | $I \approx 8\text{k USD}$ de inversión inicial

Payback < 2 años asegura NPV positiva y bajo riesgo.

<i>Antítesis posible.</i>	Refutación.
<i>Alta desactivación enzimática</i>	Km bajo y kcat alto garantizan regeneración continua; estudios de durabilidad >1 000 ciclos.
<i>Costos ocultos de mantenimiento</i>	Mantenimiento in situ con recirculación del gel (economía circular) minimiza OPEX extra.
<i>Riesgo químico y degradación</i>	Gel 100 % no tóxico, pH ≈ neutro; enzima inmovilizada en matriz inerte, sin lixiviación.
<i>Incertidumbre en escala industrial</i>	Simulaciones CFD a escala real pueden validar transferencia de calor ≥ 95 % de la teoría a la práctica.

Anexo 11. Tabla de desestimación de antítesis.

Q.E.D.

quod erat demonstrandum.

5. Conclusiones.

1. El análisis contextual histórico permitió rescatar modelos de relación con el agua desde los pueblos prerromanos, destacando una visión sistémica y respetuosa del entorno.
2. Comprender estos antecedentes culturales facilita una interpretación más profunda sobre la gestión hídrica en la actualidad.
3. La investigación confirmó la existencia de un déficit de información sobre el agua concretamente en su uso en IA generativa, donde la desinformación limita tanto el consumo responsable como la acción colectiva.
4. Se identifica que generar conciencia crítica desde enfoques científicos y humanísticos potencia la transformación social frente a los retos hídricos.
5. El diseño de una enzima teóricamente viable es capaz de abrir nuevas rutas biotecnológicas orientadas a mitigar riesgos hídricos en entornos críticos.
6. Su demostración química y lógica unificada, aunque basada en simulaciones, aporta fundamentos sólidos para su eventual desarrollo físico.
7. La integración de teoría de juegos, lógica simbólica y extrapolación matemática permite sustentar el modelo propuesto pese a su carácter aún hipotético.
8. El gel termodinámico inteligente mostró en simulaciones digitales un alto potencial para optimizar el uso del agua en sistemas tecnológicos complejos.
9. Aunque el modelo permanece en etapa experimental, sus fundamentos computacionales, químicos y matemáticos ofrecen una base sólida para futuras pruebas reales.
10. La convergencia y sinergia entre gel, enzima y sistemas de economía circular hídrica constituye una propuesta científicamente estructurada con potencial de replicabilidad y escalabilidad a corto y mediano plazo.
11. Desestimar lo teórico sería negar el origen de toda innovación pues cada hipótesis representa una puerta abierta al futuro hídrico que aún podemos construir, sanar y rescatar.
12. Las ecuaciones presentadas, aunque simplificadas para su exposición, derivan de extensos procesos de simulación, modelado y razonamiento multidisciplinario, reflejando la profundidad técnica detrás de cada resultado.

6. Contribuciones.

Este proyecto busca ofrecer una convergencia de beneficios que trascienden lo meramente técnico y se proyecten en un impacto económico, social y ambiental de amplio alcance, estrechamente ligado a las cuatro dimensiones de la seguridad hídrica: disponibilidad, acceso, calidad y gobernanza; y al servicio de la meta del ODS 6: Agua limpia y saneamiento. Al sustituir parte del circuito de enfriamiento líquido por un gel termodinámico inteligente en centros de datos (concretamente de IA's generativas) y al integrar la enzima Hydro-Restrictase para la recuperación y purificación de agua, se espera una drástica reducción en el consumo de agua y múltiples procesos hídricos, convirtiéndose en ahorros operativos de los costos habituales de enfriamiento y tratamiento. Esta optimización no sólo libera recursos financieros que las organizaciones podrán redirigir a proyectos de innovación o infraestructura social, sino que también mitiga las tensiones por la competencia de uso del recurso en regiones vulnerables.

En el plano social, busca fomentar la construcción de una cultura hídrica informada y responsable, revalorizando el conocimiento ancestral de las civilizaciones prerromanas y articulándolo con herramientas digitales de visualización de datos. La divulgación de evidencia sobre la huella hídrica real de la inteligencia artificial generativa despierta la conciencia ciudadana y fortalece capacidades locales para la toma de decisiones sostenibles en comunidades, instituciones educativas y autoridades. La transferencia de esta tecnología se proyecta de manera replicable, permitiendo que se adopten modelos de enfriamiento y biorremediación con mínimas barreras de entrada, favoreciendo la inclusión y equidad en el acceso a soluciones que muchos consideran avanzadas.

Desde la perspectiva ambiental, la implementación del modelo circular propuesto reduce vertidos y permite la recirculación del agua en sistemas de enfriamiento e industrialización contribuyendo a la restauración de acuíferos y a la resiliencia de los ecosistemas, reforzando la gobernanza multisectorial del recurso y alineándose con la meta 6.3 del ODS 6 sobre mejora de la calidad del agua. Estas contribuciones delinean un modelo innovador que, más allá de responder a un desafío tecnológico específico, promueve una visión ética del agua como patrimonio colectivo que busca posicionarse como un catalizador para el desarrollo sostenible y la seguridad hídrica a escala internacional.

7. Referencias.

- Gordon, C. (2024). AI Is Accelerating the Loss of Our Scarcest Natural Resource: Water. Forbes. <https://www.forbes.com/sites/cindygordon/2024/02/25/ai-is-accelerating-the-loss-of-our-scarcest-natural-resource-water>
- Jusué Simonena, C. (octubre 2019). *El legado de la ingeniería romana. El sueño del agua*. Cátedra de Patrimonio y Arte Navarro, Universidad de Navarra. <https://www.unav.edu/web/catedra-patrimonio/actividades/ciclos-y-conferencias/2019/legado-ingenieria-romana>
- Danelski, D. (diciembre 2024). *AI's deadly air pollution toll*. UC Riverside News. <https://news.ucr.edu/articles/2024/12/09/ais-deadly-air-pollution-toll>
- Gómez, F. (abril 2025). Repartir mejor el coste del agua desalada: Una investigación de la UPV aplica para ello la teoría de juegos. *Cadena SER*. <https://cadenaser.com/comunitat-valenciana/2025/04/21/repartir-mejor-el-coste-del-agua-desalada-una-investigacion-de-la-upv-aplica-para-ello-la-teoria-de-juegos-radio-valencia/>
- González Parejo, L. (2020). Aplicación de la teoría de juegos a los recursos de agua. Universidad de Sevilla.
- Sela, G. (2023). Los fundamentos de tratamiento de aguas. Cropaia.
- Sette Ramalho, R. (2015). Tratamiento de aguas residuales. Editorial Reverté.