

# Optimización de los recursos hídricos mediante sistemas inteligentes

Maldonado Benitez Victor Martin<sup>1</sup>, Moreno Escobar Jesús Jaime<sup>2</sup>, Morales Matamoros Oswaldo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, México

<sup>2</sup>Centro de Investigación en Computación, Instituto Politécnico Nacional, México:

v.maldonadob1500@alumno.ipn.mx, j.morenoe@ipn.mx, omoralesm@ipn.mx

0009-0002-5003-7509, 0000-0003-4032-0511, 0000-0002-3184-4869

**Resumen**—El presente trabajo explora la optimización de los recursos hídricos en organizaciones, abordando la escasez de agua y el cambio climático. Mediante el desarrollo de tres modelos basados en simulación de eventos discretos, el método Monte Carlo y la dinámica de sistemas para evaluar el suministro, consumo y reciclaje de agua. Con el objetivo de identificar puntos críticos y proponer soluciones sostenibles mediante el uso de herramientas analíticas avanzadas. Enfatizando la importancia de integrar tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT) y el aprendizaje automático (AA) para mejorar la gestión hídrica. Además, se consideran estrategias de captación, reutilización y reciclaje de agua, así como la implementación de políticas organizacionales para asegurar un uso eficiente de los recursos. El objetivo final es ofrecer una hoja de ruta para la implementación de políticas resilientes ante el cambio climático y la escasez de agua, contribuyendo al Objetivo de Desarrollo Sostenible No.6: Agua Limpia y Saneamiento.

**Summary:** This paper explores the optimization of water resources in organizations, addressing water scarcity and climate change. By developing three models based on discrete event simulation, the Monte Carlo method, and system dynamics to assess water supply, consumption, and recycling. To identify critical points and propose sustainable solutions through the use of advanced analytical tools. Emphasizing the importance of integrating technologies such as the Internet of Things (IoT) and machine learning (ML) to improve water management. In addition, water harvesting, reuse, and recycling strategies are considered, as well as the implementation of organizational policies to ensure efficient use of resources. The ultimate goal is to provide a roadmap for the implementation of climate change and water scarcity resilient policies, contributing to Sustainable Development Goal 6: Clean Water and Sanitation.

**Palabras Clave** — Engineering Management, Machine Learning (ML), Simulation Model, Sustainable Development and Systems Thinking.

## I. INTRODUCCIÓN

La escasez de agua potable es un problema mundial que se está agravándose, algunas causas se deben a raíz del cambio climático, la sobreexplotación de mantos acuíferos. Aque reporta que la distribución del agua potable en la Tierra asciende al 0.007% [1]. Más de 1,100 millones de personas en el mundo carecen de acceso directo a fuentes de agua potable, por lo que

sufren estrés hídrico, este último es impulsado por el crecimiento demográfico, así como la rápida urbanización, la constante búsqueda del vital líquido acelera la degradación de ecosistemas, sobreexplotación de río, lagunas y cuerpos de agua.

Aunado a la gestión deficiente y descuidada de los recursos hídricos pone en riesgo el suministro equitativo, tan solo en la Ciudad de México el 17% de las colonias la obtención del agua es únicamente mediante pipas, es decir, no se cuenta con una infraestructura que asegure el acceso al recurso hídrico para satisfacer sus necesidades. Con base en el Sistema de Aguas de la Ciudad de México una persona en promedio consume 380 litros al día, sin embargo, la dotación de agua en las alcaldías es de 150L por habitante, el cual se apega a las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud, la cual plantea el uso de 100L al día, lo equivalente a 6 cubetas para satisfacer necesidades de consumo e higiene [2]. Por otra parte, el 23.1% de las viviendas registran un consumo menor de 100L, lo que significa que poco más del 77% de los habitantes no tiene derecho pleno al agua.

En la actualidad existe una necesidad de generar conciencia en materia de sostenibilidad sobre la importancia de la gestión sostenible de la gestión de recursos hídricos para asegurar el suministro a largo plazo [3]. Además de fomentar el incremento de la eficiencia en el de los recursos se deben analizar los sistemas tradicionales de gestión del agua debido a que son a menudo no se tiene un reparto equitativo del vital líquido o se pierden miles de litros en fugas, lo que lleva a la necesidad de modernizar y optimizar los sistemas de suministro, así como sus diversos usos como lo son el riego, atención de necesidades personales e industriales.

La Ciencia de la Complejidad se ha consolidado como un campo interdisciplinario que busca comprender el comportamiento de sistemas complejos, los cuales se caracterizan por una serie de propiedades que los distinguen de los sistemas simples. Abordar estos sistemas implica reconocer las limitaciones del método científico tradicional y adoptar nuevos enfoques metodológicos y epistemológicos [4]. Los sistemas complejos por definición están compuestos por una gran cantidad de componentes diversos que interactúan de forma no lineal, lo que significa que pequeñas variaciones en las condiciones iniciales pueden producir grandes diferencias en los

resultados [5]. Así mismo, este tipo de sistemas son capaces de adaptarse a los cambios en su entorno a través de mecanismos de retroalimentación [6]. El comportamiento de los sistemas complejos está fuertemente influenciado por el contexto en el que operan y las condiciones iniciales [7]. Otra característica significativa de los sistemas complejos es que muestran una capacidad de adaptación y resiliencia que no se encuentra en los sistemas más simples. Los enfoques de sostenibilidad deben tener en cuenta esta capacidad de adaptación y buscar fomentar la resiliencia en lugar de intentar controlar o predecir con precisión el comportamiento del sistema [8].

Al analizar la complejidad de los sistemas hídricos, los sistemas de recursos hídricos son complejos y están sujetos a la incertidumbre es por ello que es necesario desarrollar modelos de simulación y optimización para abordar la complejidad y garantizar una gestión eficiente y equitativa [9].

El avance científico y tecnológico está avanzando a pasos agigantados cada vez, el desarrollo de nuevas tecnologías como los sensores del Internet de las Cosas (IoT), el Aprendizaje Automático (ML) en conjunto con la Inteligencia Artificial (AI), ofrece oportunidades para mejorar la gestión hídrica del agua, estas tecnologías permiten un monitoreo en tiempo real, predicciones más precisas, sistemas de control inteligentes. La implementación de sistemas inteligentes de consumo de agua con IoT permite conocer las variables más significativas para mejorar el consumo basada en condiciones climáticas mejora en los cultivos [10].

Derivado de la complejidad de los sistemas de agua se requiere el desarrollo de modelos predictivos y sistemas de control, es por ello que se debe conocer y desarrollar modelos de predicción del consumo de agua, los modelos predictivos permiten anticipar la demanda para riego y consumo residencial, para la construcción de estos modelos se utilizan datos no intrusivos y técnicas de aprendizaje automático. Así mismo, se deben desarrollar modelos predictivos de la calidad del agua, es necesario predecir la calidad del agua y optimizar la asignación de recursos en función de los en tiempo real [11].

El diseño robusto de sistemas permite identificar soluciones que funcionen de manera óptima en una variedad de condiciones futuras para aumentar la confianza en la toma de decisiones en un futuro incierto, los sistemas identificados en el estado del arte buscan la formar más eficiente para optimizar la robustez de los sistemas de gestión de agua ante condiciones cambiantes [12].

## II. METODOLOGÍA/DESARROLLO

Para el desarrollo de los modelos se emplearon tres modelos que se detallan a continuación, en los que se realizan simulaciones de consumo de agua en un periodo establecido de un mes enfocado a una organización de 30 personas, en las cuales se busca identificar los patrones de consumo, y cómo se puede reciclar. Con la finalidad de formular políticas de consumo de agua para combatir la escasez de agua.

1. Modelo SimPy es un framework (Esquema o marco de trabajo que ofrece una estructura base para desarrollar software

y aplicaciones) de simulación de eventos discretos basado en procesos y Python estándar [13].

El modelo de Simulación de Gestión Hídrica con Eventos Discretos, establece las siguientes Entradas del Modelo:

- Capacidad de Tanque de Agua: Representa el almacenamiento máximo de agua disponible para el consumo de la organización.
- Tasa de Recarga: El suministro diario de agua que recibe la organización.
- Demanda Diaria: El volumen de agua que consumen las personas con variaciones aleatorias.

Proceso:

- Cada día, el tanque se descarga en función de la demanda diaria.
- Después del consumo, el tanque se recarga hasta la capacidad máxima.
- Si el nivel de agua no es suficiente para cubrir la demanda, se registra un evento de insuficiencia.
- Si el tanque excede su capacidad durante la recarga, se registra un desbordamiento.

2. Modelo de Simulación Monte Carlo es una técnica empleada para estudiar cómo responde un modelo a entradas generadas de forma aleatoria [14].

Por otra parte, se desarrolló el modelo de Evaluación de Incertidumbres el cual integra a las variables de entrada del modelo anterior las siguientes:

- Desviación de la Demanda: Para modelar variaciones aleatorias en el consumo.

Proceso

- Se realizaron 1,000 simulaciones.
- Cada simulación representa la evolución del nivel de agua en el tanque durante 30 días.
- Para cada iteración, se calculan los días con insuficiencia de agua y desbordamiento.

3. Modelo de Dinámica de Sistemas este modelo se centrará en la dinámica de flujo y acumulación del agua, incorporando factores como:

Entradas del modelo:

- Eficiencia en el consumo las cuales podemos describir como estrategias de ahorro.
- Tasa de reciclaje en función a la recuperación y reutilización del agua.
- Pérdidas por evaporación o fugas.

Tabla 1.- Comparación General de los Modelos

Característica	Modelo SimPy	Modelo Monte Carlo	Modelo Dinámico
Nivel de Complejidad	Bajo	Medio	Medio – Alto
Manejo de Incertidumbre	Limitado	Alto	Medio
Análisis de Largo Plazo	Limitado	Posible	Alto
Eventos Críticos Identificados	Insuficiencias / Desbordamientos	Rango completo de Escenarios	Impacto de cambios sistémicos
Aplicaciones Clave	Operaciones sssDiarias	Gestión Estratégica	Políticas integrales

Es posible visualizar que antes de ejecutar los modelos el Modelo Dinámico es más complejo debido a que está contemplando la eficiencia en el consumo permitiendo el establecimiento de políticas organizaciones en materia de promover el consumo responsable de los recursos hídricos.

Las condiciones iniciales de las variables de entrada para la ejecución de los modelos son los siguientes:

- Capacidad del Tanque de Almacenamiento: 10,000 Litros.
- Tasa de Recarga: 1,500 Litros Diarios.
- Demanda Diaria: 55 Litros por persona en una jornada laboral de 8 horas, contemplando una organización de 30 personas, entonces, 1,650 Litros.
- Días de Simulación: 30 Días.

La ecuación principal empleada para el desarrollo de la simulación Monte Carlo

$$N_{t+1} = N_t + R - D_t$$

Donde:

- $N_t$ : Nivel de Agua del Tanque en el día  $t$ .
- $R$ : Tasa de recarga diaria.
- $D_t$ : Demanda diaria en el día  $t$  expresada en litros, modelada como una variable aleatoria.

Además, se consideran las siguientes condiciones:

1. Si  $N_t >$  Capacidad del Tanque, el nivel que se ajusta a la capacidad máxima que representa un desbordamiento.
2. Si  $N_t <$  0, el nivel del tanque se ajusta a 0, lo que indica una insuficiencia de agua.

El cálculo de  $D_t$  incluye un componente aleatorio para modelar la incertidumbre en la demanda diaria:

$$D_t = \mu_D + \sigma_D \cdot Z$$

Donde:

- $\mu_D$ : Media de la demanda diaria expresada en litros.

- $\sigma_D$ : Desviación estándar de la demanda diaria.
- $Z$ : Variable aleatoria estándar normal ( $Z \sim N(0,1)$ )

La ecuación principal empleada para el desarrollo del modelo de dinámica de sistemas:

$$N_{t+1} = N_t + (Recarga_t - Demanda_t - Pérdida_t)$$

Donde:

- $Pérdida_t$ : Agua perdida por evaporación o fugas durante el tiempo  $t$ .

Demanda ajustada por reciclaje:

$$Demanda_t = D \cdot (1 - Tasa\ de\ Reciclaje)$$

Pérdidas:

$$Pérdidas_t = N_t \cdot (Tasa\ de\ Pérdidas)$$

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la Simulación de Gestión Hídrica, se observa un comportamiento lineal, con las condiciones, suponiendo que el tanque de 10,000 Litros está completamente lleno, y que el consumo de agua diario en una organización de una empresa es de 1,650 Litros diarios, con una tasa de recuperación de 1,500 Litros. La empresa no corre el riesgo de quedarse sin agua en un periodo de 30 días, como se puede apreciar en la figura 1.

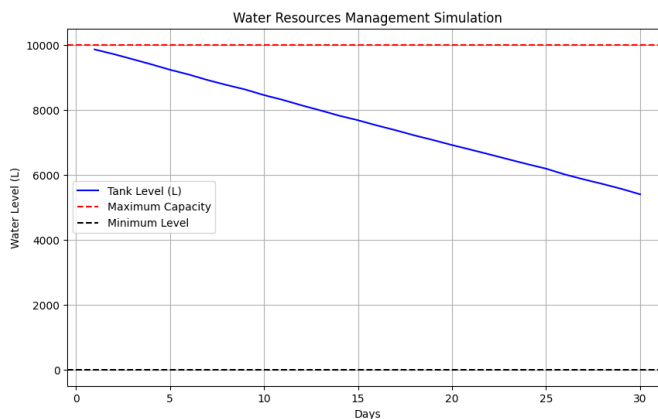


Figura 1.- Simulación de Gestión Hídrica con Método SimPy

Desafortunadamente, a diario existen fugas de agua, el ciclo del agua como la evaporación, algunas veces las personas consumen más agua de la que necesitan, es por ello que el modelo 1 de la simulación de gestión hídrica es insuficiente para poder conocer el entorno verdadero de la organización, se deben considerar más variables para la toma de decisiones estratégicas.

Con la finalidad de poder obtener un mejor modelo en cual será la Simulación Monte Carlo, que nos permite realizar iteraciones para conocer el comportamiento del consumo de agua dentro de las organizaciones, la cual facilitará estimar con

mayor precisión el, consumo facilitando la formulación de políticas organizaciones para fomentar el ahorro de consumo de agua, obteniendo como beneficio una aportación significativa al Objetivo de Desarrollo Sostenible No.6 Agua Limpia y Saneamiento, así como sus compromisos ESG [15].

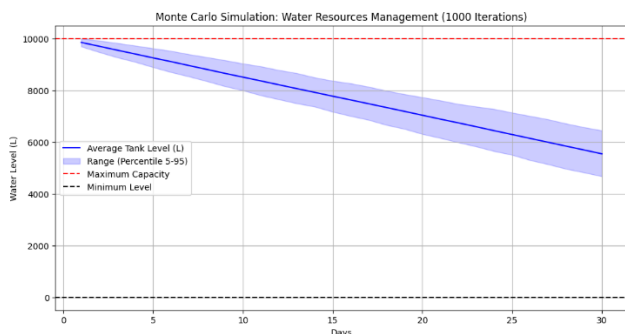


Figura 2.- Simulación de Gestión Hídrica mediante Método Monte Carlo

Como se puede apreciar en la figura anterior podemos visualizar que ya se contemplan algunas desviaciones en el consumo de agua en el área azul, sin embargo, aún hacen falta consideraciones cómo la implementación de las políticas de reciclaje de agua, la pérdida por evaporación, para ser un poco más precisos.

A continuación, se presenta el último modelo, el cual ya es dinámico y que incluye las variables aleatorias que lo convierten en complejo. Suponiendo que se establece una estrategia para el reciclaje de agua en la cual se recicla el 20% del agua. E integrando el porcentaje de pérdida debido a evaporación y fugas, este porcentaje asciende al 40% en la Ciudad de México con datos de CONAGUA [16].

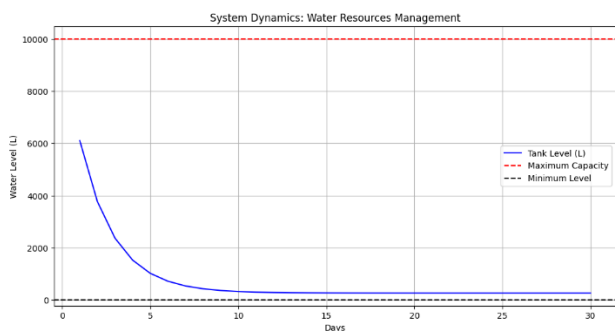


Figura 3.- Simulación de Gestión Hídrica mediante Modelo de Dinámica de Sistemas

Ahora ya es más realista el consumo de agua mediante la simulación sistémica de la gestión de los recursos hídricos, podemos determinar que el Nivel promedio del tanque durante la simulación fue de 756.50 L, la pérdida de agua a causa de fugas en la Ciudad de México es muy alta, aunque se implementen políticas de reciclaje de agua el depósito de agua apenas es suficiente para satisfacer las necesidades de los colaboradores por un mes.

#### IV. CONCLUSIONES

Cada modelo tiene una finalidad distinta y específica, desde el punto de vista del análisis operativo básico hasta la evaluación de la incertidumbre y la política global. El desarrollo conjunto de los tres modelos permitió obtener una visión más completa del sistema, ya que los dos primeros no tenían en cuenta las pérdidas de agua durante el suministro ni el impacto del reciclado del agua en la organización.

El aumento de la tasa de reciclaje y la aplicación de tecnologías de eficiencia hídrica pueden reducir significativamente el déficit de suministro. La gestión de las pérdidas por evaporación y fugas es crucial para evitar desbordamientos. Tanto las organizaciones como los ciudadanos contribuyentes deben exigir mejoras en la infraestructura de suministro de agua, ya que es inaceptable que se pierda casi la mitad del recurso.

La aplicación de modelos en conjunto con tecnologías avanzadas tiene un importante impacto positivo en el desarrollo sostenible. Estos modelos no solo optimizan la gestión del agua, sino que también contribuyen a alcanzar varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente el ODS 6, que busca garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos.

La gestión integrada de los recursos hídricos, con el apoyo de las tecnologías emergentes, refuerza la resiliencia al cambio climático, mejorando la adaptación a las condiciones climáticas extremas y garantizando un suministro estable de agua incluso en situaciones adversas.

Por lo tanto, integrando modelos analíticos con tecnologías avanzadas, conseguimos no sólo una gestión más eficiente del agua, sino también avanzar hacia un desarrollo sostenible que beneficie tanto al medio ambiente como a las comunidades, permitiéndonos construir un futuro en el que el acceso al agua pueda ser seguro y equitativo para todos.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradezco al SECIHTI que permite del desarrollo de la presente investigación, así mismo a los Doctores Oswaldo Morales y Jesús Jaime Moreno que aportan su conocimiento para el desarrollo de ciencia y tecnología aplicada, muchas gracias.

#### DECLARACIÓN ÉTICA

Esta investigación se adhiere a los más altos estándares de integridad académica. La participación de los autores Maldonado Benitez Victor Martin, Moreno Escobar Jesús Jaime y Morales Matamoros Oswaldo en este estudio, garantiza su conocimiento y acuerdo con los objetivos, métodos y el uso previsto de los resultados de la investigación. Los investigadores se comprometen a reconocer y respetar la contribución intelectual de cada autor, asegurando una representación precisa de sus ideas y hallazgos.

REFERENCIAS

- [1] Fundación Aqueae, ¿Cuál será la situación del agua en 2050?, Campus de la Revolución de las Ideas, 2024, <https://www.fundacionaqueae.org/el-agua-en-2050/>
- [2] Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), Consumo de agua, Sistema de Información Geográfica de la Agencia Digital de Innovación Pública de la Ciudad de México, 2023, <https://datos.cdmx.gob.mx/dataset/consumo-agua>
- [3] Morchid, A., Et-taibi, B., Oughannou, Z., Alami, R. E., Qjjidaa, H., Jamil, M. O., Abid, M. R., IoT-enabled smart agriculture for improving water management: A smart irrigation control using embedded systems and Server-Sent Events, Scientific African, 2024, doi:<https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02527>
- [4] Bishop, R. C., Metaphysical and Epistemological Issues in Complex Systems, En Philosophy of Complex Systems, 2011, Elsevier B.V.
- [5] Muir, O. W., The Complexity of Cell-Biological Systems, En Philosophy of Complex Systems, 2011, Elsevier B.V.
- [6] Nolfi, S., Behavior and Cognition as a Complex Adaptive System: Insights from Robotic Experiments, En Philosophy of Complex Systems, 2011, Elsevier B.V.
- [7] C. Hooker, & P. T. Dov M. Gabbay, Introduction to Philosophy of Complex Systems, En Philosophy of Complex Systems, 2011, Elsevier BV.
- [8] Ryan, A. J., Military Applications of Complex Systems, En Philosophy of Complex Systems, 2011, Elsevier B.V.
- [9] Zhao, Q., Jiang, Y., Wang, Q., & Xu, F., A distributed simulation-optimization framework for many-objective water resources allocation in canal-well combined irrigation district under diverse supply and demand scenarios, Agricultural Water Management, 2024, doi:<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109109>
- [10] Yang, J., Zhou, Y., Guo, Z., Zhou, Y., & Shen, Y., Deep learning-based intelligent precise aeration strategy for factory recirculating aquaculture systems, Artificial Intelligence in Agriculture, 2024, doi:<https://doi.org/10.1016/j.aiia.2024.04.001>
- [11] Gough, M., Rakhsia, K., Bandeira, T., Amaro, H., Castro, R., & Catalao, J., Design and implementation of a data-driven intelligent water heating system for an island community: A case study, Energy Conversion and Management, 2023, doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117007>
- [12] Zhang, Y., Zhang, F., Ai, X., Zhang, H., & Feng, Y., A dynamic big data fusion and knowledge discovery approach for water resources intelligent system based on granular computing, *Measurement: Sensors*, 2023, doi:<https://doi.org/10.1016/j.measen.2023.100899>
- [13] Universidad UNIR, Framework: qué es, para que sirve y algunos ejemplos, ¿Qué es un framework?, 2022, <https://unirfp.unir.net/revista/ingenieria-y-tecnologia/framework/>
- [14] MathWorks, Simulación Monte Carlo en MATLAB, Simulación Monte Carlo, 2025, <https://la.mathworks.com/discovery/monte-carlo-simulation.html>
- [15] Agenda 2030, Agenda 2030, Objetivo de Desarrollo Sostenible 6: Agua Limpia y Saneamiento, 2017, <https://www.gob.mx/agenda2030/articulos/6-agua-limpia-y-saneamiento>
- [16] Ramírez, P., Agua perdida: los miles de millones de litros desperdiciados por fugas en México, Animal Político, 2024, <https://animalpolitico.com/sociedad/fugas-agua-desperdicio-mexico>