

Resumen

Esta investigación contribuye al avance de la modelación sustitutiva como una técnica poderosa en el campo de la simulación computacional que ofrece numerosas ventajas para resolver eficientemente problemas complejos. En particular, este estudio destaca el papel crucial de la modelación sustitutiva en la gestión de aguas subterráneas. Integrando factores clave como el cambio climático y aprovechando el aprendizaje automático, especialmente las redes neuronales, la investigación facilita la toma de decisiones más informada, reduciendo significativamente el costo computacional de modelos numéricos complejos.

El impacto del cambio climático es un enfoque central, y el primer estudio tiene como objetivo construir modelos de datos sustitutivos para evaluar los efectos del cambio climático en los recursos de aguas subterráneas, también en el futuro. El estudio implica la comparación entre métodos estadísticos y diferentes tipos de Redes Neuronales Artificiales (ANN). La eficacia de los modelos sustitutivos se demostró en el norte de la Toscana (Italia), pero puede extenderse fácilmente a cualquier área de interés. El método estadístico adoptado implica analizar datos históricos de precipitación y temperatura junto con niveles de agua registrados en pozos de monitoreo. Inicialmente, el estudio explora posibles correlaciones entre índices meteorológicos e índices de agua subterránea; si se identifica una correlación, se emplea un análisis de regresión lineal para establecer relaciones entre ellos. Estas relaciones establecidas se utilizan luego para estimar los futuros niveles de

agua subterránea en función de las proyecciones de precipitación y temperatura obtenidas de un conjunto de Modelos Climáticos Regionales, bajo dos Trayectorias de Concentración Representativa, conocidas como RCP4.5 y RCP8.5.

Posteriormente, se implementaron tres modelos distintos de Inteligencia Artificial (AI), AutoRegressive No Lineal con Entradas Exógenas (NARX), Memoria a Largo y Corto Plazo (LSTM) y Red Neuronal Convolutiva (CNN) para evaluar el impacto del cambio climático en los recursos de aguas subterráneas para el mismo caso de estudio. Específicamente, estos modelos fueron entrenados utilizando directamente datos históricos de precipitación y temperatura como entrada para proporcionar niveles de agua subterránea como salida. Después de la fase de entrenamiento, los modelos de IA desarrollados se utilizaron para prever los futuros niveles de agua subterránea utilizando las mismas proyecciones de precipitación y temperatura y escenarios climáticos descritos anteriormente. Los resultados resaltaron diferentes salidas entre los modelos utilizados en este trabajo. Sin embargo, la mayoría de ellos predice una disminución en los niveles de agua subterránea como resultado de futuras variaciones en la precipitación y temperatura. El estudio también presenta las fortalezas y debilidades de cada modelo. Notablemente, el modelo LSTM emerge como el enfoque más prometedor para predecir futuros niveles de agua subterránea.

Dentro del mismo campo, se desarrolló una ANN con la capacidad de simular las condiciones de agua subterránea en la cuenca cerrada de Konya, Turquía, uno de los sitios piloto investigados como parte del proyecto InTheMED. Este modelo sirve como herramienta para examinar los impactos potenciales del cambio climático y las políticas agrícolas en los recursos de agua subterránea dentro de la región. El objetivo final de esta aplicación es proporcionar una herramienta fácil de usar, basada en la red neuronal entrenada. La simplicidad inherente del modelo sustitutivo, con una interfaz directa y resultados fáciles de entender, juega un papel crucial en los procesos de toma de decisiones.

En cuanto al transporte de contaminantes, se implementó una ANN para resolver diferentes problemas directos e inversos. El problema directo trata sobre la evaluación de concentraciones en pozos de monitoreo, mientras que el problema inverso implica la identificación de fuentes de contaminantes y su historial de liberación. Demostró eficiencia al abordar problemas de transporte tanto directos como inversos, ofreciendo resultados confiables con una carga computacional reducida.

El estudio también aborda el desafío de la interpretabilidad de las ANNs y el llamado “problema de generalización” a través de las Redes Neuronales Informadas por la Física (PINNs). Al incorporar restricciones basadas en la física, las PINNs llenan la brecha entre la modelación basada en datos y las interpretaciones basadas en la física, ofreciendo un enfoque prometedor para las simulaciones numéricas de aguas subterráneas. En este estudio, se desarrolló una PINN para simular el flujo en un acuífero no confinado.

Finalmente, se presentan dos contenidos adicionales. Primero, se utiliza una ANN para resolver un problema inverso en el campo de los sistemas de alcantarillado. Luego, se describe un ejemplo fácilmente interpretable de modelado numérico del flujo de aguas subterráneas utilizando hojas de cálculo, desde una perspectiva didáctica.

En conclusión, esta investigación subraya la importancia de la modelación sustitutiva, el aprendizaje automático, el análisis del cambio climático y los enfoques informados por la física en el avance de las estrategias de gestión de aguas subterráneas y más allá, proporcionando herramientas valiosas para que los tomadores de decisiones aborden problemas complejos de flujo de aguas subterráneas en condiciones ambientales cambiantes.