

Hydrogeological model based on the numerical deepening method, applying the Back Propagation Neural Network technique for the evaluation of large water seeps inside an underground mine in Peru

Zulema Castro-Francia, BSc¹, Pier Jeri-Blas, BSc¹, Humberto Pehovaz-Alvarez, PhD¹, Carlos Raymundo, PhD¹

¹Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Peru, u201311362@upc.edu.pe, u201314732@upc.edu.pe, pcgmhpeh@upc.edu.pe, carlos.raymundo@upc.edu.pe

Abstract - The objective of this research is to propose a conceptual model based on neural networks (ANN), which lies in its ability to approximate any measurable Borel function, with the desired degree of precision, as indicated by Hornik et al. to the. (1989). ANNs became very useful in predictions, such as time series; since its ability to learn, within a large amount of data; it is potentially noisy. Starting from the collection of field information through diamond drilling (for the characterization of the rocky massif) and the use of geological maps, aerial photographs and satellite images as a means of studying groundwater. All this, in order to determine the main study parameters that will be used for the design of the hydrogeological model to be proposed. Likewise, a quality control tool is used to carry out the respective analysis of the main sources of mistakes detected. However, it requires the establishment of some standards to evaluate the quality of the data, including the successive manipulations carried out on the raw data acquired by the sensors. Finally, the hydrogeological model is constituted whose purpose is to contribute together with the geomechanical model for the mining design and to determine possible cases of risks that are frequent inside an underground mine due to the subsoil water.

Keywords - Artificial Neural Network, Mining Works, Groundwater, Hydrogeology.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.586>
ISBN: 978-958-52071-8-9 ISSN: 2414-6390

Modelo hidrogeológico basado en el método numérico de profundización, aplicando la técnica Back Propagation Neural Network para la evaluación de grandes filtraciones de agua en el interior de una mina subterránea del Perú

Zulema Castro-Francia, BSc¹, Pier Jeri-Blas, BSc¹, Humberto Pehovaz-Alvarez, PhD¹, Carlos Raymundo, PhD¹

¹Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Peru, u201311362@upc.edu.pe, u201314732@upc.edu.pe, ppgmhpeh@upc.edu.pe, carlos.raymundo@upc.edu.pe

Abstract– El objetivo de esta investigación es proponer un modelo conceptual basado en las redes neuronales (ANN), la cual radica en su capacidad para aproximarse a cualquier función medible de Borel, con el grado de precisión que se desee, tal como indica Hornik et al. (1989). Las ANN se hicieron muy útiles en predicciones, como series temporales; ya que su capacidad de aprendizaje, dentro de una gran cantidad de datos; es potencialmente ruidoso. Partiendo de la recopilación de información de campo mediante perforaciones diamantinas (para la caracterización del macizo rocoso) y el uso de mapas geológicos, fotografías aéreas e imágenes satelitales como medio de estudio de las aguas subterráneas. Todo ello, con el fin de determinar los principales parámetros de estudio que servirán para el diseño del modelo hidrogeológico que se desea proponer. Así mismo, se maneja una herramienta de control de calidad que se encargara de realizar los respectivos análisis de las principales fuentes de error detectadas. No obstante, requiere el establecimiento de algunas normas para evaluar la calidad de los datos, incluyendo las sucesivas manipulaciones realizadas en los datos brutos adquiridos por los sensores. Finalmente, se constituye el modelo hidrogeológico que tiene como finalidad contribuir junto al modelo geomecánico para el diseño de minado y determinar posibles casos de riesgos que son frecuentes en interior de una mina subterránea a causa del agua del subsuelo.

Keywords– Red Neuronal Artificial, Labores Mineras, Agua subterránea, Hidrogeología.

I. INTRODUCTION

Desde una perspectiva global, es fundamental analizar uno de los principales problemas que afecta directamente la estabilidad de las labores mineras subterráneas. En particular, dichos efectos que causa en la minería subterránea representan una enorme preocupación, debido a las actividades relacionadas con la explotación minera trayendo como consecuencias inundaciones, impactos ambientales, riegos laborales y afectaciones a la estructura del macizo rocoso. Son múltiples los factores que influyen en la estabilidad del macizo rocoso; es por ello, que se procederá en el estudio de las aguas subterráneas. Las condiciones inestables presentes en estos tipos de roca, se van incrementando en condiciones de mayor presencia de agua (en cuanto a goteos y flujos); así como también, presencia de agua ácida, los materiales rocosos carbonatados y presencia de arcilla en el análisis de agua. Los

impactos son diversos y varían de acuerdo con las diferentes etapas de evolución de la explotación; en este sentido, el efecto es de tipo hidrogeológico.

En términos generales, en las explotaciones mineras el agua constituye el agente natural de mayor incidencia como condicionante de inestabilidades y a su vez de otros problemas geotécnicos y geomecánico asociados. Sin embargo, en base a los estudios se determinó una lista de efectos negativos que se generan como consecuencia de la presencia de agua en el entorno operativo. Algunos de estos casos perjudiciales que son más frecuentes se presentan en las operaciones mineras y son las siguientes: 1. Inundaciones a gran escala, en la que puede parar las operaciones y requiere de grandes equipos para su evacuación. 2. Incrementos de la corrosión de sistemas. 3. Reducción de la vida útil del sostenimiento. Consecuentemente, se hace presente el incremento del deterioro del túnel o labor minera subterránea.

El diseño y localización del conjunto de sistema es esencial y específico por cada situación imprevista. El máximo beneficio costo-efectivo, simplemente parte de poder alcanzar cuando la instalación es precedida de un completo y detallado programa de estudio y ensayos predeterminados. Lo que conlleva, a un estudio exhaustivo en base a investigaciones de autores que han trabajado en situaciones similares y nos sirve de base para poder definir con una mayor precisión el desarrollo de la investigación. Frente a esta situación ha surgido como objetivo de esta investigación analizar que técnica puede predecir las cantidades y presencia de agua entrante que probablemente aparecerán durante las excavaciones. Con el avance de los estudios realizados, se determinó que el uso de la aplicación de la Red Neuronal Artificial en la ingeniería; para resolver problemas de recursos hídricos y relacionados con el medio ambiente, es el óptimo.

La importancia del presente estudio, radica en la precisión y exactitud de los resultados que se obtienen a través del método empleado. De los cuales las principales capacidades que vamos a utilizar son de recopilar, analizar, memorizar y procesar grandes volúmenes de datos obtenidos. Finalmente, el presente artículo explicará en el estado del arte cuáles han sido los autores referenciados para identificar los

principales parámetros a utilizar para el modelo hidrogeológico conceptual. Entre ellos estudiaremos la relación de la influencia del agua con el macizo rocoso, los parámetros de mayor relevancia para la investigación y mediante métodos numéricos cómo utilizando herramientas de redes neuronales, el uso de redes neuronales en la identificación de parámetros hidrológicos y geológicos.

II. ESTADO DE ARTE

A. Modelo hidrogeológico

Diversos autores han desarrollado investigaciones de la aplicación del modelo hidrogeológico respecto a la influencia del agua subterránea en diversos escenarios de la ingeniería, así mismo para ejecutar el trabajo se debe realizar el procedimiento de reconocimiento del área para poder determinar la ubicación y el flujo de agua [1][2]. Ello se explica como a gran profundidad en interior mina se puede ver afectado por la filtración de agua debido a la construcción de una labor minera. Debido a este evento se incrementa el riesgo generado por el agua subterránea en el macizo rocoso. Por ello, que es importante tomar en consideración la ubicación, sumándole el tipo de clima en la que se encuentra el área de estudio [3][4][5].

El proceso que identifican y diseñan se basa en un plan de procesos para determinar la ubicación y el nivel del agua subterránea en una mina subterránea mediante un proceso de propagación, el cual puede proporcionar un marco para una respuesta rápida de la entrada de agua. Se presenta el proceso de reconocimiento el cual crea un conjunto de entrada de agua, calculando el proceso de propagación, para que después los agrupe recolectando grandes cantidades [6][7].

De acuerdo con los procesos de dispersión de agua pueden tener similitudes utilizando algunos modelos de dinámica de fluidos, por ejemplo: el Modelo de Gestión de aguas pluviales (SWMM). Lo cual se ha utilizado en la simulación del flujo de agua subterránea urbana, flujo de cueva y el flujo de agua kárstica. Otro claro ejemplo, en una de las minas de Brasil, en la que hay un estudio de control de agua subterránea bajo un análisis por la presencia de características kársticas ubicadas cerca del río Santa Catarina. Determinaron un modelo hidrogeológico para poder establecer escenarios de canalización y reducir el impacto del macizo rocoso mediante el flujo del agua.

B. Método numérico empleado a la minería subterránea basado en un modelo hidrogeológico.

El modelo numérico empleado a la minería subterránea basado en un modelo hidrogeológico, se ejecuta bajo el software Feflow en la que se trabaja con ecuaciones de elementos finitos, teniendo en consideración los sistemas de recursos hídricos que a menudo son las que se involucran tanto meteorológicos como hidrogeológicos (precipitación, caudal, cuenta, entre otras) [8][9]. En la elaboración del modelo hidrogeológico se incluyen estudios de sondajes de las investigaciones hidrogeológicas dentro de las labores mineras,

principalmente centrándose en la profundización debido a las filtraciones del agua subterránea en interior del macizo rocoso. Así mismo, contribuye a determinar los parámetros, presión de agua que se encuentra en el macizo rocoso y siendo complementado con estudios hidroquímicos [10][11].

Los sistemas acuíferos son uno de los más relevantes de tener en cuenta en modelo hidrogeológico, ya que su profundidad compete con el tipo de roca que se encuentra un yacimiento o cuenca subterránea. Cada sistema acuífero hidráulica o químicamente son caracterizados en forma numérica, una de las formas más complicadas en determinar una precisión con menor incertidumbre, es por ello la utilización con las mejoras de las redes neuronales [12][4].

C. Redes neuronales aplicado en un modelo hidrogeológico

La aplicación de las redes neuronales artificiales se ha determinado como la principal herramienta de estimación, ya que son de uso en la caracterización del área de estudio. La precisión de las redes ha ido evolucionando y adaptándose a las deficiencia y retos de la ingeniería. Para demostrar la capacidad de las redes neuronales en el ámbito de la clasificación y determinación de los parámetros principales hidrológicos se analizan bajo diferentes técnicas de redes neuronales [6][13][14].

En el desarrollo del método de validación de datos basados en redes neuronales es muy valiosa por su gran mayoría por su capacidad de almacenamiento y eficiencia en los resultados con márgenes mínimos de errores. para un modelo de ondas y redes neuronales se han probado tres combinaciones de las cuales se obtuvieron diferentes entradas para optimizar el rendimiento del modelo, nivel antiguo de agua subterránea, datos climatológicos y la combinación de los datos de ambos anteriores mencionados para pronosticar el nivel de agua en los pozos significativamente [15][5].

D. Aplicación de las redes neuronales en el método número de profundización.

La aplicación de las redes neuronales artificiales como principal herramienta de estimación, es utilizada ampliamente en la ingeniería como la petrolera para la identificación de los estudios de yacimientos de petróleo, por lo que tiene la habilidad de extraer relaciones no lineales de un conjunto de datos esparcidos [2][16]. Diversos autores han podido demostrar la efectividad de las redes neuronales en relación con los métodos tradicionales. Siendo así que los otros métodos solo detectaban un aprox. de 13% y con el ARN fue capaz de detectar todo tipo de errores independientes a la magnitud de las mismas [17][18]

Al investigar el desarrollo de las redes neuronales establece que los algoritmos estén más enfocados hacia la optimización de ciertas funciones, también indican que no requieren de un algoritmo específico para resolver un problema y estas solo establecen las entradas y salidas de los fluidos teniendo como resultado datos experimentales que sirven para enseñar a la red neuronal y poder comparar el resultado real con la calculada [19][20].

En términos generales, los autores han demostrado la gran importancia de poder predecir estos tipos de eventos de influencia de agua subterránea debido a los efectos secundarios que genera en las minas; sin embargo, para ejecutar esta investigación es necesario la previa clasificación de los datos recopilados en campo y definir cuáles son las de mayor relevancia en el área de estudio. Así mismo, no se han realizado estudios en la que puedan determinar utilizando solamente las condiciones iniciales, sino que en su mayoría se apoyan en los resultados finales para poder analizar y aportar la posible predicción lo que no es posible poder tener un enfoque claro y aplicar los métodos correspondientes en la práctica tan solo por no ser considerado los puntos iniciales al comenzar con la investigación.

III. APORTE

A. Fundamentación

La presente investigación propone un método que se basa en un proceso que da inicio con la identificación de parámetros principales, siendo necesario establecer un filtro respecto al nivel de significancia de cada uno de los parámetros y las variables dentro de la ejecución del método. Para conseguirlo es necesario identificar la relación de cada uno de los parámetros con su parámetro de salida dentro de la red. Para poder identificarlo se utilizó las características principales de la mina Islay que nos permitirán identificar el origen de las variables respecto a sus acompañantes y nos darán el nivel de significancia. Para mejorar la finesa de los resultados solamente se utilizará los que posean una ponderación mayor al 50% de los casos, dado que si es menor revela que no poseen una relación directa con el parámetro de salida que se está estudiando.

Habiendo reconocido las características físicas y las condiciones hidrológicas, es posible esquematizar y describir los parámetros relacionados con la presencia de aguas subterráneas, su participación en el ciclo hidrológico y su interrelación con la geósfera. La aplicación del método propuesto es retardadora, ya que existen pocos registros del método empleado para minería subterránea.

B. Método propuesto

El método de las redes neuronales artificiales para el análisis de las aguas subterráneas es usado hoy en día para analizar la información de filtraciones. En primer lugar, la identificación de parámetros básicos de ingeniería permitirá estudiar el modelo hidrogeológico; el determinar las características hidrogeológicas del macizo rocoso nos permite analizar los datos del régimen del agua en labores subterráneas. La investigación que busca analizar la información de los datos piezométricos del área de estudio; al incluir el método de las redes neuronales ayudara a validar el modelo hidrogeológico disminuyendo la mayor cantidad de incertidumbre de datos recopilados en campo.

Mediante investigaciones, en el transcurrir del tiempo han surgido problemas en algunos campos de la ingeniería. Es por

ello, que recientemente las técnicas de inteligencia artificial son usadas hoy en día para resolver como, por ejemplo, problemas de la ingeniería petrolera. En los últimos años, una serie de artículos han sido publicados. Estos artículos han sido divididos en dos categorías. El primero, usa redes neuronales para analizar la información de litología de los registros de pozos, y segundo, usan redes neuronales para elegir un modelo de yacimiento para ser usado en un estudio convencional de prueba de interpretación de pozos. Por ende, la metodología se establecerá conforme se vaya construyendo la red neuronal.

En el presente esquema, se visualiza los pasos generales a seguir para la elaboración del trabajo de investigación en relación al modelo hidrogeológico.

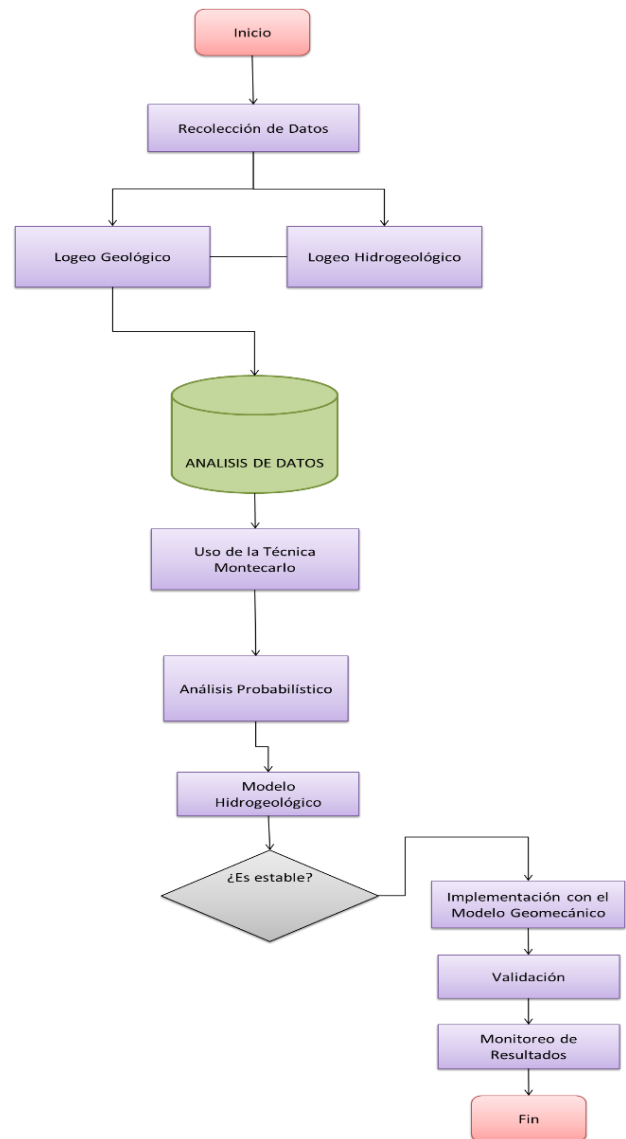


Fig. 1 Método propuesto

En la Fig. 1, se observa los pasos que se siguieron para poder realizar la investigación del modelo hidrogeológico

conceptual. Mediante la recopilación de los datos, análisis y la validación.

C. Componentes del método

Identificación de Características Geológicas e Hidrogeológicas; el modelo conceptual fue construido en base a la información geológica e hidrogeológica con los datos proporcionados de la mina Islay, para determinar las características de la zona de estudio, a partir del cual se delimitó:

Tabla de Caracterización geológico e hidrogeológica	
Geología	
Tipo de roca	Roca caliza
Tipos de Vacíos	Poros, fisuras
	Muy variable
Permeabilidad	0.1 - 300 mm/día
Unidad Hidrogeológica	
	Sub volcánicas
	Suelo fluvio-glaciár; arcillas y gravas
	Fm. Calera; margas y lutitas

Fig. 2 Características Geológicas e Hidrogeológicas

El monitoreo en interior mina que se nos proporcionó se inspeccionan los puntos de descarga en las labores subterráneas, con el fin de observar la evolución de caudales y sus parámetros fisicoquímicos.

Se realizaron dos campañas de monitoreo; en junio 2017 se registró (64) puntos y en febrero 2018 se registró sesenta (60) puntos, habiendo identificado; filtraciones, sondajes, piezómetros, y circulación de agua en las pozas, cámaras de bombeo, canales, tuberías y bocaminas.

Las unidades hidrogeológicas que presenta la mina según sus características hidráulicas e hidrodinámicas a menudo se encuentran ligadas a las unidades geológicas y/o litológicas, focalizados fundamentalmente en interior mina.

Las unidades hidrogeológicas se organizaron por su estudio específico, y agrupados como:

- Acuífero. – De los cuales permite almacenar, circular y proporcionar fuentes de agua importantes, tanto para uso potable y no potable, y por lo general de moderada a alta permeabilidad, con características de almacenamiento alto.
- Acuitardo. – Del cual retarda el movimiento del agua y presenta baja permeabilidad.
- Acuícludo. – Presenta una unidad poco permeable, que conteniendo apreciables cantidades de agua en su interior incluso hasta la saturación, no la transmiten.
- Acuífugo. – Del cual presenta muy baja permeabilidad, y bajas características de almacenamiento interno.

De acuerdo a la interpretación hidrogeológica del área, se reconoció cuatro (04) unidades hidrogeológicas, entre ellas rocas; sub volcánicas, brechas hidrotermales, y una potente capa de margas rojas y limolitas intercalada con delgadas

capas de caliza de la Fm. Calera, y finalmente suelos fluvio-glaciarios de cobertura que recubren la superficie en gran parte del área.

A continuación, se describen las unidades hidrogeológicas más importantes:

Unidades Hidroestratigráficas	Conductividad Hidráulica		Espesor (m)	Clasificación
	(cm/s)	(m/d)		
Suelo fluvio-glaciár, arcillas y gravas	2.3E-03 a 2.9E-03	2.0 a 2.5	0.5 a 12	Acuitardo
Fm. Calera; margas y lutitas	2.3E-05 a 1.3E-03	0.02 a 1.1	>350	Acuífugo a Acuitardo
Fm. Calera; margas calcáreas	2.3E-05 a 1.7E-03	0.02 a 1.5	>100	Acuífero
Brechas Subvolcánicas	5.8E-05 a 2.3E-04	0.05 a 0.2	>500	Acuitardo

Fig. 3 Clasificación de las unidades hidrogeológicas del área de Islay

Análisis de los datos Piezométricos:

Al analizar la información de los datos piezométricos de la mina Islay, se ejecutaron tres (03) sondajes de investigación hidrogeológica en superficie, los que tuvieron profundidades de 6, 10 y 50 m todos verticales (-90°) piezómetros abiertos tipo Casagrande, la que permitió analizar el monitoreo de niveles de agua y obtener muestras de agua subterránea.

Sondaje	Coord. UTM (WGS-84)			Prof. (m)		Tubería Ranurada (m)		Stick Up (m)	N.P. (mbnt)
	Este	Norte	Altitud (msnm)	Prog	Ejec	De	a		
SH-01	339704	8782713	4571	50.0	50.2	141.9	216.2	0.63	8.4
SH-02 A	339436	8782716	4588	50.0	50.0	29.4	44.3	0.60	26.8
SH-02 B				10.1	10.0	10.1	5.1	0.55	8.8
SH-03 A	339477	8782475	4583	50.0	50.0	24.8	39.7	0.55	23.4
SH-03 B				6.0	6.0	6.0	4.0	0.55	2.60

Fig. 4 Sondajes Hidrogeológicos Ejecutados

En la Figura 4, se presentan los piezómetros instalados de los cuales fueron codificados; SH-01, SH-02A, SH-02B, SH-03A y SH-03B, los que fueron diseñados según las características del perfil litológico del subsuelo y nivel freático identificado durante las perforaciones, e instalados según procedimientos establecidos.

Una vez instalado el piezómetro se tomaron lecturas de niveles estáticos estabilizados o piezométrico, y también tomando lecturas de los parámetros fisicoquímicos del agua, previa limpieza del pozo antes de la obtención de muestras.

De manera particular los piezómetros HG-01, HG-02 y HG-03 registraron una piezometría concéntrica aparentemente de flujo radial, con gradiente de 0.08 en las margas fracturadas de baja permeabilidad. Este cambio en la piezometría se observó en los piezómetros de doble tubo, donde existe doble nivel superficial y otra ligeramente profunda, con niveles que oscilaron entre 13.5 y 48.0 m por debajo de la superficie de la laguna Shegue, lo que confirma la escasa conexión hidráulica de las margas basales, las que actúan como barrera hidráulica para el flujo de las aguas subterráneas.

Tras el análisis y recopilación de los datos piezométricos concluimos que el régimen de flujo de las aguas subterráneas depende de su grado de permeabilidad de las rocas transmisivas, como niveles de calizas dentro de grupo de margas estratificadas, y las anomalías estructurales que atraviesan estas unidades favorecen su conexión hidráulica con superficie. Los flujos son escasos en los niveles superiores de mina, en tanto las descargas de mina con cierto grado de confinamiento estarían ligadas al flujo proveniente del oeste, donde afloran rocas vinculadas a las anomalías estructurales.

De manera general, se estima que los mayores flujos de agua subterránea, se producen en rocas calcáreas aflorante en interior mina con cierto grado de karsticidad, en áreas con estructuras mineralizadas, los que probablemente constituyen los medios de recarga lateral, los que forman gradientes hidráulicos más llanos. Sin embargo, las rocas volcánicas y las margas forman gradientes hidráulicos altos debido a su baja transmisividad, donde las aguas subterráneas para su flujo requieren mayor carga hidráulica.

D. Modelo hidrogeológico aplicando redes neuronales

Con los resultados obtenidos de los objetivos 1,2 y 3, se pudo identificar y evaluar las mejoras que se pueden generar para conseguir mejores resultados en la eficiencia de la estabilidad de las labores mineras, también se pudo determinar los parámetros de las labores más influyentes, como el dimensionamiento de las áreas de estudio, sus condiciones geológicas, los parámetros influenciados en la filtración de agua subterránea en interior mina.

En este objetivo se proponen los pasos para reconstruir un modelo hidrogeológico con el método de redes neuronales artificiales. Se presenta una metodología simple con un análisis, debido a la alta cantidad de variables y/o parámetros que influyen para la construcción de un modelo hidrogeológico, a continuación, se presenta una secuencia para modelar:

- Selección de datos para calibrar (datos de Piezómetros)
- Funciones de transformación (Litología)
- Función de activación
- Cantidad de capas
- Elección de las variables de entrada (Precipitación, evaporación, temperatura, etc.)
- Algoritmos de entrenamiento
- Parámetros al inicio de calibración (Perforación hidrogeológica, nivel piezométrico, conductividad hidráulica, etc.)

La información geológica y los datos hidrogeológicos adquiridos durante estudios del Modelo Hidrogeológico conceptual se delimitó el dominio, las unidades hidrogeológicas, las características y escenarios físicos más relevantes. Así como también para establecer el modelo hidrogeológico se ejecutaron mapeos geológicos, revisión de la hidrología, pruebas hidráulicas, litología, piezometría,

patrones de flujo, estructuras tectónicas, y la descarga subterránea en mina, determinación de la anisotropía vertical y horizontal, entre otros.

Con la realización del método de redes neuronales artificiales introducidos en un Modelo Hidrogeológico conceptual, ya se conocen softwares que permiten el entrenamiento de las RNA y es por ello que se ha determinado reconstruir un modelo que unifique las operaciones necesarias para modelar y predecir la influencia de agua subterránea bajo el control de los procesos utilizados.

En la investigación se presenta los siguientes pasos:

- *Análisis de series temporales:* cálculo de datos estadísticos (como la media, desvió estándar, mín. y máx., coeficiente de asimetría, entre otros) de cada serie a utilizar. Por otro lado, permite poder calcular el tiempo de concentración de la labor y con ello, elegir una amplitud de la ventana de tiempo que será de acceso a las variables de entrada. Como parte de la información adicional, la incorporación del módulo para el cálculo del tiempo de la propagación de una onda en crecimiento en el cauce, se utiliza la ecuación de Manning.
- *Entrenamiento de la red neuronal:* El módulo para entrenar el ARN perceptrón multicapa (MLP) tiene un nodo en la capa de salida, uno en la capa oculta y el número requerido de nodos en la capa de entrada. Puede elegir entre tres funciones de activación de la capa oculta, cuatro algoritmos de entrenamiento y dos funciones de destino. También le permite usar datos de validación para entrenar la red con el fin de comparar la evolución de la función objetivo de la serie de validación con la serie de entrenamiento y detenerla cuando se detecta sobreentrenamiento.
- *Validación de la red neuronal:* La red puede ser validada y graficar una serie de observaciones simuladas en la que se podrá comparar gráficamente.
- *Análisis de resultados:* Calcula diferentes índices estadísticos para el análisis de los resultados. Los índices que calcula son: índice de Akaike (AIC), coeficiente de Nash y Sutcliffe (Nash), error cuadrático medio, error relativo absoluto medio, error medio, coeficiente de persistencia y coeficientes de umbral (Ts).
- *Modelo modular de redes neuronales artificiales:* Permite desarrollar un modelo modular con una red auto-organizativa de Kohonen (SOM) (Self-Organizing Maps) que clasifique los datos y redes perceptrón multicapa (MLP) para modelar cada grupo clasificado con la red SOM. La secuencia ordenada se puede procesar gráficamente para visualizar la separación de grupos y seleccionar la red SOM más adecuada para el problema. La formación en grupo se puede realizar de forma conjunta o seleccionando cada grupo por separado.
- *Intervalos de confianza:* Contiene un módulo para calcular el intervalo de confianza de cualquier modelo. Estos se basan en la obtención de la función de distribución del caudal observado condicionado al caudal

previsto. Permite el uso de diferentes gráficas para seleccionar siete funciones de distribución para que cada serie determine cuál es el par de distribuciones más adecuado para el problema.

IV. VALIDACIÓN

A. Descripción del escenario

El área en donde se realizó la investigación fue en una mina subterránea, en la cual la influencia del agua subterránea se presenta en el interior de las labores, del cual se ejecutó un estudio de la verificación de los problemas que ejerce en el macizo rocoso. Como se observa en la figura N°9, la mina se encuentra ubicada en el Paraje Comunhuasi de la Estancia Islay en la localidad San Agustín de Huaychao, del distrito Huayllay, provincia y departamento de Pasco, con altitudes que varían entre 4 600 y 4 625 m.s.n.m.

Esta empresa cuenta con distintas labores subterráneas en operaciones, la mayoría de ellas se encuentran cercana a la microcuenca de la Laguna Shegue. Esta zona se encuentra emplazada en rocas volcánicas andesíticas.

Para validar nuestro método es necesario el uso de un escenario donde se presente la influencia de agua subterránea en las labores, por ello se utilizó una mina de gran profundidad con presencia de influencia de agua. Se identificó y clasificó los datos para encontrar y validar los parámetros de ingreso utilizados con las redes neuronales para el modelo hidrogeológico conceptual.

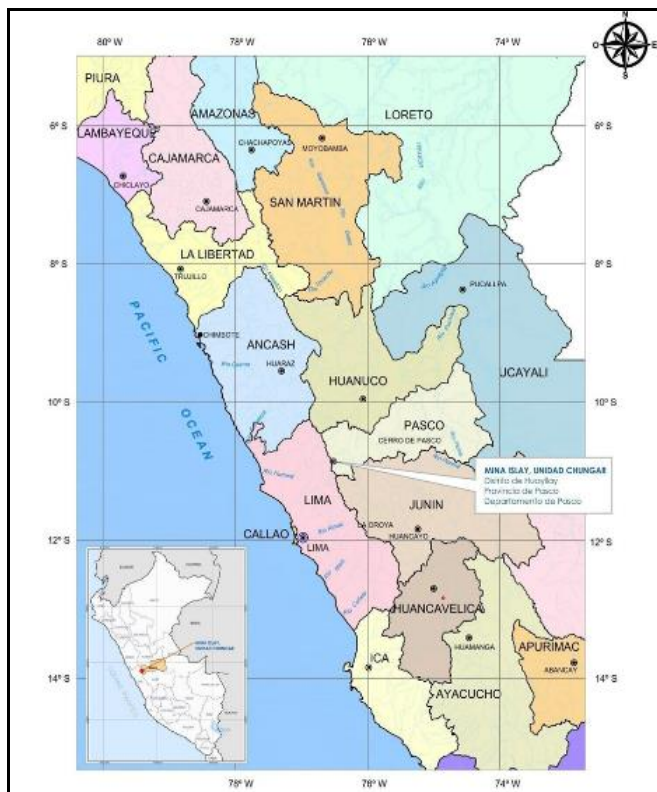


Fig. 5 Plano de ubicación de la unidad minera Islay

B. Diagnostico inicial

La mina Islay, una gran superficie se encuentra cubierto por la Laguna Shegue, bofedales y depósitos cuaternarios, la mayor parte en las zonas de altiplanicie el basamento de roca se encuentra cubiertos, sin embargo, en las escasas zonas positivas de área afloran rocas volcánicas y margas de las unidades litológicas más antiguas.

Habiendo reconocido las características físicas y las condiciones hidrológicas, es posible esquematizar y describir los parámetros fundamentales en relación con la presencia de agua subterránea, su participación en el ciclo hidrológico y su interrelación con la geosfera. El mapeo hidrogeológico se realizó con el fin de evaluar la condición actual de las fuentes subterráneas y las características hidráulicas de las unidades hidrogeológicas, procediendo con el monitoreo de fuentes que consistió en la identificación y caracterización de cuerpos de agua subterránea con descarga natural y artificial, los que descargan directamente a superficie y en interior mina; filtraciones taladros, sondajes, piezómetros, canales, pozas de bombeo, y cuerpos de agua en superficie; manantiales, captaciones, canales, etc., los que discurren en el área.

C. Aplicación del aporte en el escenario

Respecto al uso de redes neuronales artificiales en un Modelo Hidrogeológico conceptual las unidades calcáreas son las unidades más permeables del área, catalogados como “acuífero” de moderada conductividad hidráulica, la que actúan como medio de flujo mayor para las aguas subterráneas. Se comportan como “semi confinado”; dominado por las secuencias calcáreas y margas. No se presenta conexión hidráulica entre las aguas de la laguna Shegue y la mina profunda, estas descargas están relacionados a los flujos regionales de las montañas altas y tal vez en algunas desde cuencas aledañas.

El nivel freático se encuentra deprimido por el drenaje de las labores mineras y actualmente se encuentran deprimidos en forma concéntrica, hacia la labor más profunda. Actualmente las labores subterráneas se dirigen hacia el Suroeste y hacia la zona Sur Oeste, en la que se proyecta el Túnel Integración, estas labores todavía no hayan cortado niveles permeables, pero de acuerdo a la litología proyectada es probable se corte niveles calcáreos, los cuales pueden incrementar significativamente los caudales de drenaje.

N°	Litología	k [cm/s]	k [m/d]	k [m/s]	m/s* k=10 ⁻⁴	Kh / Kv/Kz	Dirección (°)
01	Caliza	1.50E-03	1.29	1.52E-05	0.15	1,0	0
02	Margas	1.00E-04	0.09	1.06E-06	0.01	1,0	0
03	Arenisca	1.30E-03	1.1	1.3E-05	0.13	1,0	0
04	Conglomerado	8.20E-04	0.71	8.39E-06	0.08	1,0	0
05	Brecha	1.90E-04	0.16	1.89E-06	0.02	1,0	0
06	Dacita (*)	4.30E-04	0.37	4.37E-06	0.04	1,0	0
07	Vulcano clástico	3.00E-04	0.26	3.07E-06	0.03	1,1	0

Fig. 6 Propiedades hidráulicas estimadas piezómetros y perforaciones

En Fig. 6, se observa la conductividad hidráulica obtenido en las rocas interior mina y en suelos de superficie, los que fueron ejecutados en seis (6) sondajes, y en los piezómetros existentes con ensayos tipo "Slug Test".

Respecto al uso de redes neuronales artificiales en un Modelo Hidrogeológico conceptual las unidades calcáreas son las unidades más permeables del área, catalogados como "acuífero" de moderada conductividad hidráulica, la que actúan como medio de flujo mayor para las aguas subterráneas. Se comportan como "semi confinado"; dominado por las secuencias calcáreas y margas. No se presenta conexión hidráulica entre las aguas de la laguna Shegue y la mina profunda, estas descargas están relacionados a los flujos regionales de las montañas altas y tal vez en algunas desde cuencas aledañas.

El nivel freático se encuentra deprimido por el drenaje de las labores mineras y actualmente se encuentran deprimidos en forma concéntrica, hacia la labor más profunda. Actualmente las labores subterráneas se dirigen hacia el Suroeste y hacia la zona Sur Oeste, en la que se proyecta el Túnel Integración, estas labores todavía no hayan cortado niveles permeables, pero de acuerdo a la litología proyectada es probable se corte niveles calcáreos, los cuales pueden incrementar significativamente los caudales de drenaje.

Finalmente, los resultados obtenidos evidencian la mejora de minimización de incertidumbre en la estabilidad de las labores mineras. Esta investigación propone el uso de las redes neuronales artificiales al modelo hidrogeológico conceptual para que otras minas realicen estudios de prueba con el uso de los softwares recomendados para evaluar la factibilidad de prever la ineficiencia de la estabilidad de las labores mineras.

V. DISCUSIÓN

Cuando comparamos los resultados de nuestra investigación con los de diversos autores notamos diversas diferencias y similitudes. En primer lugar, todos señalan la importancia de los muchos casos que han enfrentado problemas de inundaciones de aguas subterráneas convirtiéndose en un reto para la ingeniería. Por otro lado, detallan que es un potencial agente de corrosión y deterioro de la estabilidad de las labores mineras, es por ello que los autores mencionan que es difícil predecir, diseñar e incluso saber la ubicación exacta del flujo de agua. Según los resultados de la modelación numérica en el modelo hidrogeológico determinó que entre los materiales más permeables están las calizas y conglomerados, los que contribuyen con el agua subterránea a las labores. También, se ha determinado que, debido a la profundización de la mina, durante el año 2017 en junio se observó un caudal promedio de 136.2 l/s y en diciembre 141.7 l/s. Para el año 2018, se manifestó un incremento en enero de 144 l/s y finalizando diciembre, 148.1 l/s. Estimando que las labores obtendrán descargas que se incrementarían de 140 a 155 litros por segundo durante los años 2019 a 2020; así mismo, la modelación numérica de profundización; como modelo base,

se trabaja en un Modelo Hidrogeológico, para observar la variación de niveles fluctúa entre 4,430 a 4,140 msnm; cuyas direcciones de flujo se concentran hacia las labores mineras profundas, debido a la interconexión de vetas con las calizas y áreas mineralizadas de moderada transmisividad.

Este artículo contribuye a la red neuronal artificial en la predicción de incertidumbre de modelos hidrogeológicos, en este proceso se analizan las conclusiones y nuevas ideas de investigación para mejorar los puntos de vista presentados. Esto es muy importante cuando se crean modelos predictivos para determinar qué proceso físico modelar según los datos disponibles. Por ejemplo, si se dispone de datos de filtraciones de aguas subterráneas en las labores afectadas, el modelo deberá ser capaz de modelar la propagación de una onda en cauce y no el proceso de transformación de lluvia escorrentía. El problema de utilizar sólo estos datos es que el horizonte máximo de predicción dependerá del tiempo que tarda la onda de crecida en viajar de la estación aguas arriba a la estación donde se realizan las predicciones. (Francés et al., 2008)

La aplicación de las RNA en varios aspectos de la modelación hidrológica ha llevado a resultados interesantes y prometedores en los últimos años. (Kang et al., 1993). El secuenciamiento para la construcción de un modelo de RNA, proponen iniciar con el desarrollo de la elección de los elementos más importantes que componen la red. El cálculo de incertidumbre de las predicciones ha resultado ser muy eficiente, es susceptible ante las mejoras de la metodología y mediante la incorporación de la variabilidad del coeficiente de correlación ante el flujo de agua subterránea.

Las redes neuronales artificiales para el modelamiento hidrogeológico a comparación del modelo base se propuso lo siguiente: La Hidroquímica indica tres (03) facies; tipo "sulfatadas cálcicas" atribuido a descargas de interior mina en contacto con cuerpos mineralizados, margas y calizas de moderada salinidad; aguas "bicarbonatada magnésica-cálcica" de baja salinidad en rocas calcáreas y volcánicos y descargas superficiales y aguas "bicarbonatadas sódicas" corresponde a descargas superficiales de depósitos fluvio-glaciares. También de acuerdo a su pH las aguas de mina oscilaron entre 7.4 y 7.7, ligeramente alcalinas, con TDS hasta 1,235 mg/l, aguas de contacto con cuerpos mineralizados, en tanto las margas fracturadas y piezómetros oscilaron entre 7.3 y 7.6 neutras con TDS no mayor a 632 mg/l, sin embargo, las descargas en rocas volcánicas tuvieron pH entre 6.8 y 8.8.

Finalmente, con el uso de las redes neuronales se determinó según el balance hídrico de interior mina, que el agua en el Nivel 230 con 24.6 l litros por segundo (17.8%), el Nivel 250 con 61.2 litros por segundo (44.2%), sigue el Nivel 270 con 13.2 litros por segundo (9.5%), el Nivel 280 con 22 litros por segundo (15.9%), y el resto procede de labores antiguas 4.6 litros por segundo (3.3%). Mediante los resultados, se procedió realizar un análisis profundo de la influencia de cada elemento obtenidos de la RNA y mejorar las deficiencias identificadas. En la presente tesis, se prioriza la elección de las variables con la que se dio inicio el modelamiento hidrogeológico para ser insertados en la capa de

entrada y obtener una mayor precisión en los resultados. Así mismo, la importancia de identificar la serie de datos para una buena calibración y sus funciones correspondientes.

VI. CONCLUSIONES

Debido al incremento en el caudal de drenaje en la mina Islay (marzo 2017) alcanzó un pico de 140 l/s, (enero 2018) y 200 l/s, (Julio 2018) se recomienda, ampliar el sistema de impulsión y conducción para un caudal máximo de 314 l/s, para un escenario de profundización al 2021 según el Plan de Minado, debido a la interceptación de capas de calizas de la Fm. Calera Inferior y la alta heterogeneidad de la roca, esta puede producir caudales picos en las capas de margas calcáreas.

El objetivo de este trabajo corresponde a la evaluación de la incertidumbre predictiva asociada a los parámetros hidrológicos y geológicos obtenidos de la mina modelo para ser introducidos a las redes neuronales con el fin de lograr un resultado óptimo de precisión.

Se han reconocido cuatro unidades hidrogeológicas; 1) Acuitardo en suelos fluvio-glaciares, 2) Acuitardo en margas y limolitas, 3) Acuífero en calizas margosas, 4) Acuitardo en brechas volcánicas, de los culés fueron considerados para la caracterización de la Hidrogeología del área.

En la metodología propuesta, para la construcción de un modelo de RNA, se propone una metodología que se tome en cuenta la elección de cada uno de los elementos más importantes que componen a una red, dando ideas para la elección de las variables de entrada y metodologías sistemáticas para los demás elementos.

Es de suma importancia profundizar en la elección de la serie de datos utilizada para la calibración y las funciones de transformación de los datos que se requerirán de entrada.

REFERENCIAS

- [1] K. S. Kasiviswanathan and K. P. Sudheer, "Methods used for quantifying the prediction uncertainty of artificial neural network based hydrologic models," *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, vol. 31, no. 7, pp. 1659–1670, 2017, doi: 10.1007/s00477-016-1369-5.
- [2] Y. Zhao, Q. Wu, T. Chen, X. Zhang, Y. Du, and Y. Yao, "Location and flux discrimination of water inrush using its spreading process in underground coal mine," *Saf. Sci.*, vol. 124, no. December 2019, p. 104566, 2020, doi: 10.1016/j.ssci.2019.104566.
- [3] A. González-Quirós and J. P. Fernández-Álvarez, "Conceptualization and finite element groundwater flow modeling of a flooded underground mine reservoir in the Asturian Coal Basin, Spain," *J. Hydrol.*, vol. 578, no. August, 2019, doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.124036.
- [4] J. Werner, *Introducción a la hidrogeología*. 1996.
- [5] I. O. Hernández, "Aplicación de Redes Neuronales en la ingeniería petrolera," 2017.
- [6] O. Kisi, M. Alizamir, and M. Zounemat-Kermani, "Modeling groundwater fluctuations by three different evolutionary neural network techniques using hydroclimatic data," *Nat. Hazards*, vol. 87, no. 1, pp. 367–381, 2017, doi: 10.1007/s11069-017-2767-9.
- [7] H. Ninanya, N. Guiguer, E. A. Vargas, G. Nascimento, E. Araujo, and C. L. Cazarin, "Analysis of water control in an underground mine under strong karst media influence (Vazante mine, Brazil)," *Hydrogeol. J.*, vol. 26, no. 7, pp. 2257–2282, 2018, doi: 10.1007/s10040-018-1785-3.
- [8] Y. Z. Kaya, F. Üneş, and M. Demirci, "Groundwater Level Prediction Using Artificial Neural Network and M5 Tree Models," pp. 195–201, 2018, doi: 10.24193/awc2018_23.
- [9] F. Huang, J. Huang, S. H. Jiang, and C. Zhou, "Prediction of groundwater levels using evidence of chaos and support vector machine," *J. Hydroinformatics*, vol. 19, no. 4, pp. 586–606, 2017, doi: 10.2166/hydro.2017.102.
- [10] S. M. Uchucchacua, F.- Ii, S. M. Uchucchacua, and F. Ii, "INFORME FINAL " EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LAS LABORES,"" 2014.
- [11] J. Gallupe, "Consideraciones Técnicas Que Influyen En La Construcción De Pozos De Agua y Piezómetros en la Minería Barrick Misquichilca SAC: 2014," 2018.
- [12] H. Yazicigil, C. Er, J. S. Ates, and M. Z. Camur, "Effects of solution mining on groundwater quality in the Kazan trona field, Ankara-Turkey: Model predictions," *Environ. Geol.*, vol. 57, no. 1, pp. 157–172, 2009, doi: 10.1007/s00254-008-1291-3.
- [13] S. M. Guzman, J. O. Paz, and M. L. M. Tagert, "The Use of NARX Neural Networks to Forecast Daily Groundwater Levels," *Water Resour. Manag.*, vol. 31, no. 5, pp. 1591–1603, 2017, doi: 10.1007/s11269-017-1598-5.
- [14] H. Fattahi and S. Karimpouli, "Prediction of porosity and water saturation using pre-stack seismic attributes: a comparison of Bayesian inversion and computational intelligence methods," *Comput. Geosci.*, vol. 20, no. 5, pp. 1075–1094, 2016, doi: 10.1007/s10596-016-9577-0.
- [15] X. Wen, Q. Feng, R. C. Deo, M. Wu, and J. Si, "Wavelet analysis-artificial neural network conjunction models for multi-scale monthly groundwater level predicting in an Arid Inland River Basin, northwestern China," *Hydrol. Res.*, vol. 48, no. 6, pp. 1710–1729, 2017, doi: 10.2166/nh.2016.396.
- [16] A. Nasser and M. J. Mohammadzadeh, "Evaluating distribution pattern of petrophysical properties and their monitoring under a hybrid intelligent based method in southwest oil field of Iran," *Arab. J. Geosci.*, vol. 10, no. 1, 2017, doi: 10.1007/s12517-016-2766-2.
- [17] A. Madueño, M. López, J. Estévez, and J. V. Giráldez, "Aplicación a niveles en ríos," pp. 189–192, 2016, [Online]. Available: <http://www2.ual.es/SNIH16/web/Web/4-09.pdf>.
- [18] M. D. Jesús E., J. N. Hervé J., M. M. Luis E., and L. S. Miguel A., "Modelo hidrogeológico conceptual para la evaluación del acuífero de la planicie aluvial del río motatán (Venezuela)," *Rev. Geogr. Venez.*, vol. 52, no. 1, pp. 31–44, 2011, [Online]. Available: <http://www.saber.ula.ve/bitstream/handle/123456789/33945/articulo2.pdf;sequence=1>.
- [19] L. Pujol Reig, "Predicción de caudales en tiempo real en grandes cuencas utilizando Redes Neuronales Artificiales," Tesis Dr., p. 288, 2009.
- [20] S. Del, R. Í. O. Rapel, and R. D. E. Coquimbo, "Simulaciones Predictivas Con Aplicación En," 2018.