



UNIVERSIDAD
PRIVADA
DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería de Minas

“ESTIMACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS
GEOMECÁNICAS DEL MACIZO ROCOSO
MEDIANTE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL”

Trabajo de investigación para optar al grado de:

Bachiller en Ingeniería de Minas

Autores:

Carlos David Bardales Correa

Carlos Zamora Muñoz

Asesor:

Ing. Elmer Ovidio Luque Luque

Cajamarca - Perú

2019

DEDICATORIA

A mi sustento de todo. Mi familia, mi adorada madre, mi amada y siempre paciente
esposa, y a mi razón de ser, mi hijo.

Carlos B.

A mi madre, quien me inculcó que incluso la tarea más grande se puede lograr si se
hace con perseverancia y un paso a la vez

Carlos Z.

AGRADECIMIENTO

A aquellas personas con quienes tuve la fortuna de coincidir en tiempo y espacio, y de alguna manera contribuyeron a fortalecer mi formación personal, espiritual, emocional y académica

Carlos B.

Agradezco a dios por cuidarme y protegerme durante toda mi vida y darme fuerzas para salir adelante, para superar obstáculos y dificultades.

A mi madre, que con su demostración de mujer luchadora me ha enseñado a no rendirme ni desfallecer ante nada y siempre perseverar a través de sus sabias enseñanzas

Gracias a las personas que ayudaron directa e indirectamente en la realización y culminación de este proyecto

Carlos Z.

Tabla de contenido

DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTO	3
ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
RESUMEN.....	7
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	8
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA.....	12
CAPÍTULO III. RESULTADOS	15
CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES	20
REFERENCIAS	21

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Artículos incluidos en la revisión, según las palabras claves utilizadas.....	14
Tabla 2. Relación de Estudios realizados en los cuales se enfoca a la inteligencia artificial como alternativa tecnológica	16
Tabla 3. Relación de Estudios en los cuales se analiza la caracterización de rocas con inteligencia artificial	16

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Año al que corresponden los artículos seleccionados en este estudio..... 19

Figura 2. Ubicación Geográfica de los países de los cuales se seleccionó lo artículos en estudio..... 19

RESUMEN

La Inteligencia Artificial, cada vez está más presente en diversas actividades humanas, los avances tecnológicos son el soporte de múltiples procesos automatizados orientados a la optimización del funcionamiento general en un proyecto; en la minería, son muchas las actividades críticas que merecen una importante atención; entre ellas la geomecánica, que representa el estudio fundamental a llevado a cabo a lo largo del desarrollo de un proyecto minero, principalmente en las fases de exploración, diseño y explotación. En esta revisión se busca armonizar la aplicación de la Inteligencia Artificial y sus técnicas (como las redes neuronales) con la estimación de las características geomecánicas de un macizo rocoso.

En las bases de datos académicas como Scielo, Redalyc, Researchgate y el buscador Google Académico, existe información referente a este tema, en tal sentido, es así que, se ha realizado una revisión sistemática de esta literatura, correspondiente al período 2008 – 2018, que nos permita analizar las evidencias encontradas referente a: a) La Inteligencia Artificial y las redes neuronales, b) la caracterización geomecánica del macizo rocoso y c) Su eficiente interrelación y aprovechamiento de sus ventajas operacionales.

PALABRAS CLAVES: Inteligencia Artificial, Redes Neuronales, Caracterización Geomecánica, Macizo Rocosos

ABSTRACT

Artificial Intelligence, is increasingly present in various human activities, technological advances are the support of multiple automated processes aimed at optimizing the overall operation in a project; In mining, there are many critical activities that deserve significant attention; among them the geomechanics, which represents the fundamental study carried out throughout the development of a mining project, mainly in the exploration, design and exploitation phases. This review seeks to harmonize the application of Artificial Intelligence and its techniques (such as neural networks) with the estimation of the geomechanical characteristics of a rock mass.

In the academic databases such as Scielo, Redalyc, Researchgate and the Google Academic search engine, there is information regarding this topic, in this sense, it is so, a systematic review of this literature, corresponding to the period 2008 - 2018, has been carried out. that allows us to analyze the evidence found regarding: a) Artificial Intelligence and neural networks, b) the geomechanical characterization of the rock mass and c) Its efficient interrelation and use of its operational advantages.

keywords: Artificial Intelligence, Neural Networks, Geomechanical Characterization, Rock Massif

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Al realizar la construcción de una estructura sobre un macizo rocoso, es indispensable saber cuál es su comportamiento y que respuesta ofrece frente a dicha construcción. Se debe tener en cuenta un conjunto de actividades muy importantes para caracterizarlo como: determinar su grado de fracturamiento, meteorización, definir su litología, resistencia, las propiedades de las discontinuidades como su espaciado, persistencia, rugosidad, abertura, relleno, filtraciones, además sobre muestras extraídas de la roca se pueden realizar diferentes ensayos de laboratorio que determinen otras propiedades y características importantes. En este sentido tal como lo descrito por (García Benítez, López Molina, & Castellanos Pedroza, 2016), ‘La confiabilidad en la distribución tridimensional de las propiedades del macizo rocoso, mejora el diseño de las estructuras seguras y rentables’.

En diversas áreas de estudio, los investigadores basan su interés en el desarrollo de modelos que estimen y/o predigan las propiedades o parámetros con alto grado de certeza y confiabilidad (Galvis Carreño, Ochoa, Arguello Fuentes, Carvajal Jiménez, & Calderón Carrillo, 2011), en torno a ello tomando en consideración que la Geomecánica representa una de las más importantes actividades previas al desarrollo de una labor sobre un macizo rocoso, es preciso garantizar la confiabilidad de los resultados en la estimación de los parámetros geomecánicos.

En la minería, la clasificación geomecánica de un macizo rocoso, se enfoca principalmente en dos objetivos: el primero, es se enfoca en identificar las propiedades geomecánicas de la roca que garanticen la viabilidad y estabilidad de la labor en construcción y el segundo está orientado en definir qué deficiencias respecto a las características

encontradas requieren ser superadas para continuar con éxito las labores extractivas (Perez, y otros, 2018)

Sin embargo, en el proceso de definición de las propiedades geomecánicas de un macizo rocoso, se encuentran involucrados factores aleatorios que podrían propiciar cierto nivel de incertidumbre, tanto en fases exploratorias como en las etapas de construcción y operación; estas, pueden estar relacionadas a la propia naturaleza de los macizos rocosos, como a las herramientas de caracterización y las técnicas o metodología utilizadas (López Molina, Caballero Ramos, Montiel Gutiérrez, Castellanos Pedroza, & García, 2016).

En los últimos años, los métodos de la Inteligencia Artificial (IA) se vienen utilizando con gran éxito en la optimización de múltiples procesos empresariales e industriales; en la minería, ya se la utiliza para descifrar diversos patrones operacionales y obtener óptimos resultados, como por ejemplo las mejores prácticas en la recuperación de minerales, disminución del gasto energético, entre otros. Uno de los métodos de la Inteligencia Artificial, son las redes neuronales artificiales, estas constituyen un enfoque fundamentalmente distinto que consiste en generalizar las interacciones entre las variables de entrada y salida de un conjunto de datos; tal que, emulando la funcionalidad del cerebro humano, se dota a ciertos algoritmos automatizados la capacidad de aprender, propiciando la obtención de mejores resultados luego de un adecuado proceso de entrenamiento. Debido a esta capacidad de aprender, las redes neuronales presentan un gran potencial en el modelado de comportamientos de rocas a partir de datos experimentales según lo descrito por (Galvis et al., 2011), esto en relación al tema en revisión.

En ese sentido, nos surge la interrogante: ¿Es posible determinar eficientemente la caracterización geomecánica de un macizo rocoso, en base la capacidad de aprendizaje y respuesta de las redes neuronales a parámetros registrados y procesados en bases de datos y software inteligentes?

Es así que, partiendo de la revisión literaria científica, se plantea el objetivo de este estudio como: Definir la interrelación de la inteligencia artificial, principalmente el método de las Redes Neuronales, con la apropiada determinación de las Caracterización Geomecánica de un Macizo Rocoso.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

Tipo de Estudio

En esta investigación se utilizó como método de estudio la revisión sistemática de la literatura científica, en la cual se analizaron y sintetizaron las evidencias encontradas en investigaciones en torno a la interrelación armoniosa de la inteligencia artificial, principalmente uno de sus métodos como lo es las Redes Neuronales, para optimizar la Caracterización Geomecánica de un Macizo Rocoso.

El proceso de selección

Los artículos seleccionados corresponden a las bases de datos Scielo.org (Scientific Electronic Library Online), Redalyc.org (Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal), Researchgate.net (Red Social en internet, y herramienta de colaboración, dirigida a personas que hacen ciencia) y el motor de búsqueda Google Académico (buscador de Google enfocado y especializado en la búsqueda de contenido y literatura científico-académica), utilizando las palabras clave: “Inteligencia Artificial”, “Redes Neuronales”, “Caracterización Geomecánica” y “Macizo Rocoso” en idiomas español e inglés, y el uso de conectores como “AND” y “OR”

Criterios de selección y exclusión

Se consideraron como criterios de inclusión: artículos publicados en las bases Scielo, Redalyc, Researchgate, y el motor de búsqueda Google Académico, correspondientes al período entre los años 2008 y 2018, cuyo tópico principal fuese la Caracterización Geomecánica de un macizo rocoso utilizando Inteligencia Artificial y principalmente el método de las Redes Neuronales. Además, se consideró como documentación científica, a temas relacionados con el uso de la Inteligencia Artificial en la actividad minera, también documentos relacionados a la determinación de la geomecánica en macizos rocosos en áreas

en las que se desarrollan proyectos mineros. Las publicaciones escogidas corresponden al tipo artículos científicos, revistas y tesis, y el criterio se basó en el mayor acercamiento al uso de la inteligencia artificial, para la determinación de la caracterización de los macizos rocosos en zonas de influencia de proyectos mineros.

Como criterio de exclusión se tomó en cuenta básicamente que el estudio se centre en el uso de las redes neuronales en la etapa de exploración de un proyecto mas no en etapas de producción, además de la exclusión de documentos repetitivos o que enfocan el tema desde la misma perspectiva, y que no se encuentren en el rango de los años del 2010 al 2018

El proceso de clasificación de los documentos se desarrollo en una tabla, en la que se registraron los siguientes campos: autores, año de publicación, país donde se llevó a cabo, el estudio, institución, metodología del estudio y un breve resumen (Tabla 1).

Tabla 1. *Artículos incluidos en la revisión, según las palabras claves utilizadas*

Fuente	País	Institución	Metodología	Resumen
López, J., Caballero, H., Montiel, E., Castellanos, V., García, S., 2016	México	UNAM, Instituto de Ingeniería, Geotecnia	Revisión	Se discutió el tema de la Armonización de propiedades de macizos rocosos a partir de herramientas experimentales, empíricas e inteligentes.
García, S., López, J., Castellanos, V., 2016	México	Sociedad Geológica Mexicana	Revisión	Se discutió el tema de una red neuronal recurrente como una alternativa para predecir la variación espacial de algunas propiedades índice de roca en medios escasamente instrumentados.
Galvis, L., Ochoa, C., Arguello, H., Carvajal, J., Calderón, Z., 2011	Colombia	Universidad EAFIT	Revisión	Se discutió la combinación de dos técnicas de inteligencia artificial, redes neuronales y algoritmos genéticos, para el desarrollo de una herramienta computacional utilizada para la estimación de propiedades mecánicas de la roca.
Galán, R., Jiménez, A., Sanz, R., Matía, F., 2010.	España	Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial	Revisión	Se introduce el Control Inteligente y las técnicas de inteligencia artificial que se usan en el diseño de sistemas de control complejos, que por su dificultad son inabordables por técnicas clásicas.
Gómez, J., Sánchez, J., Ocampo, A., Restrepo, J., 2012.	Colombia	Escuela de Ingeniería de Antioquía	Revisión	Se presenta una metodología basada en redes neuronales que permite clasificar arcillas, en base a sus propiedades.
Acevedo, E., Serna, A., Serna, E., 2008	Colombia	Corporación Universitaria Remington	Revisión	Revisa la temática de redes neuronales artificiales, para definir los componentes básicos que las conforman
López, J., Caballero, H., 2016	México	Universidad Nacional Autónoma de México	Revisión	Revisa la Armonía de las propiedades de macizos rocosos a partir de herramientas experimentales, empíricas e inteligentes.
de Moya Anegón, Herrero Solana, & Guerrero Bote, 2008	España	Universidad de Granada España	Revisión	Revisa la Aplicación de las Redes Neuronales como Herramienta informática para la recuperación de información
Acevedo M., Serna A., & Serna M., 2017	Colombia	Universidad Autónoma Latinoamericana	Revisión	Se enfoca en los principios y características básicas de las Redes Neuronales

Fuente: Elaborado por los investigadores

CAPÍTULO III. RESULTADOS

La recopilación de documento científicos realizada mediante el acceso a motores de búsqueda y bases de datos científicas, arrojó un total 133 documentos, entre artículos científicos, publicaciones de revistas científicas relacionadas al tema de investigación y trabajos de tesis. Luego de los criterios de exclusión utilizados, los documentos analizados fueron un total de 22, de los cuales se descartaron 13 de ellos por no corresponder directamente a la interrelación de la inteligencia artificial como herramienta tecnológica en la determinación de las características geomecánicas de los macizos rocosos. Los 09 documentos tomados en cuenta finalmente encontrados mediante el motor de búsqueda Google Académico, de los cuales, 02 de ellos directamente obtenidos de la Base de Datos Scielo, 02 de la base Redalyc y 05 mediante Google Académico, en el período comprendido entre los años 2008 y 2018, distribuidos de la siguiente manera, considerando los siguientes criterios: 1) Estudios realizados en los cuales se enfoca a la inteligencia artificial como alternativa tecnológica y 2) Estudios en los cuales se analiza la caracterización de rocas con inteligencia artificial. Según detalle de las tablas 2 y 3.

Tabla 2. Relación de Estudios realizados en los cuales se enfoca a la inteligencia artificial como alternativa tecnológica

Orientación del Estudio	País	Publicación del Artículo	Año	Institución
Control inteligente para el diseño de sistemas complejos	España	Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial	2010	Universidad Politécnica de Madrid
Temática de las Redes Neuronales	Colombia	Actas de Ingeniería	2008	Corporación Universitaria Remington
Redes Neuronales en la Recuperación de Información	España	-	2008	Universidad de Granada
Principios de las Redes Neuronales	Colombia	Actas de Ingeniería	2017	Universidad Autónoma Latinoamericana

Fuente: Elaborado por los investigadores

Tabla 3. Relación de Estudios en los que analiza a la caracterización de rocas con inteligencia artificial

Orientación del Estudio	País	Revista de Publicación del Artículo	Año	Institución
Propiedades de macizos rocosos con herramientas inteligentes	México	Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial	2016	UNAM, Instituto de Ingeniería, Geotecnia
Redes Neuronales como alternativa de predicción de propiedades de las rocas	México	-	2016	Sociedad Geológica Mexicana
Combinación de Técnicas de la Inteligencia Artificial para la estimación de propiedades mecánicas de la roca	Colombia	-	2011	Universidad EAFIT
Redes Neuronales en la Clasificación de Arcillas	Colombia	-	2012	Escuela de Ingeniería de Antioquía
Propiedades de macizos rocosos con herramientas experimentales e inteligentes	México	-	2016	Universidad Autónoma de México

Fuente: Elaborado por los investigadores

Los resultados producto de la revisión son descritos a continuación, tomando en consideración la interrogante antes indicada y con la finalidad de mejor claridad, se discuten los documentos organizados en dos criterios.

En relación a los estudios realizados en los cuales se enfoca a la inteligencia artificial como alternativa tecnológica:

Actualmente son diversas las aplicaciones de las redes neuronales artificiales, múltiples tareas o proceso son automatizados y optimizados según lo que se espere obtener, mediante procedimientos de entrenamiento que favorecen su gran potencial y su capacidad de aprendizaje.

Hay variedad de autores involucrados en el fortalecimiento del concepto de las redes neuronales como alternativa tecnológica que pretende emular la forma de trabajar del cerebro de forma artificial, en consecuencia, cada vez está más cerca el momento en que se logre que un computador aprenda de forma similar a la que lo hace el hombre.

Según (Acevedo M., Serna A., & Serna M., 2016), a futuro es posible tener posibilidad de integrar la inteligencia artificial, las redes neuronales y la realidad virtual en procesos de automatización sin ninguna, o muy poca, participación humana, para ello se deberá continuar los estudios al respecto.

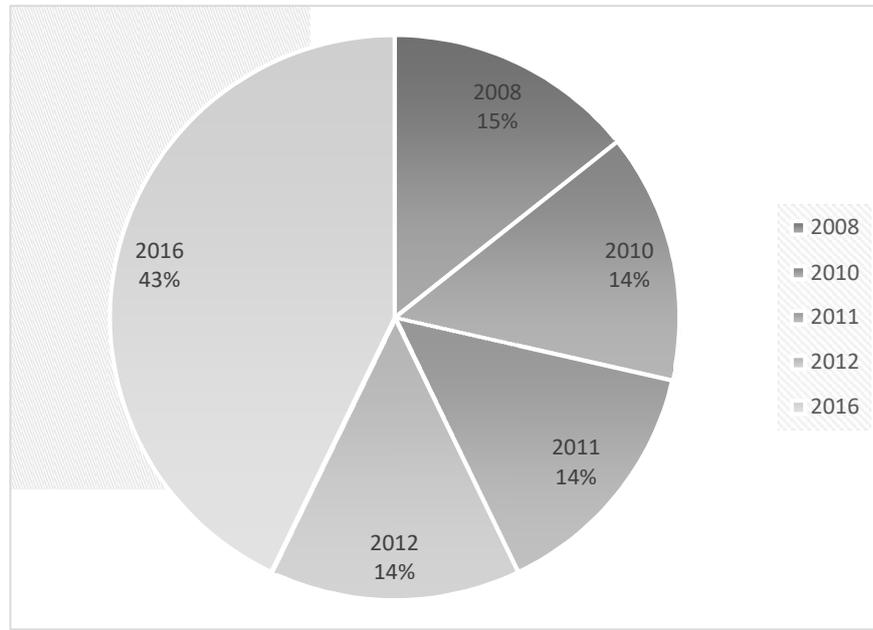
(de Moya Anegón, Herrero Solana, & Guerrero Bote, 2008), en su estudio denominado “La aplicación de Redes Neuronales Artificiales(RNA): a la recuperación de la información”, ubica a las Redes Neuronales en el campo de la “Computación Cognitiva” o “Computación del Mundo Real”, indicando como sus principales características la capacidad de Aprendizaje Adaptativo, Auto organización, Tolerancia a fallos, Operación en tiempo real y su facilidad de inserción en la tecnología existente. Estas cualidades potencian a las Redes Neuronales Artificiales como un método de la Inteligencia Artificial capaz de optimizar con gran éxito múltiples procedimientos en diferentes campos de acción.

En relación a los Estudios en los cuales se analiza la caracterización de rocas con inteligencia artificial:

(Galvis Carreño, Ochoa, Arguello Fuentes, Carvajal Jiménez, & Calderón Carrillo, 2011), con la combinación de dos técnicas de la Inteligencia Artificial: Algoritmos Genéticos y Redes Neuronales, lograron calcular las propiedades mecánicas de la roca (Resistencia a la tensión, resistencia a la compresión con confinamiento y resistencia a la compresión sin confinamiento) con un porcentaje de error aceptable (dentro de los límites aceptados en laboratorio de mecánica de rocas) y con un buen ajuste de estimación de la resistencia en las tres pruebas, concluyendo que las Redes Neuronales Artificiales muestran que puede ser el modelo de confianza para la determinación de las propiedades mecánicas utilizando para ello información de la petrofísica y con el requerimiento de un conjunto de datos experimentales previos. Resaltando finalmente que de la misma manera se pueden utilizar datos de otro tipo de rocas y dependiendo del volumen de datos se encontrarán buenos resultados dentro del dominio de los valores utilizados.

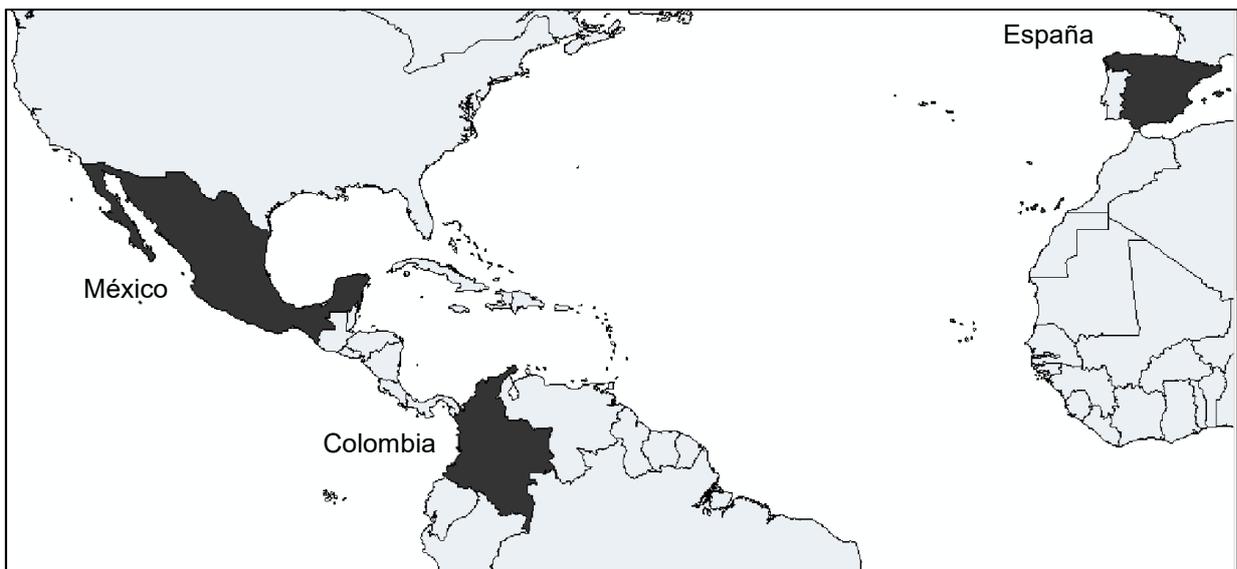
De los documentos revisados, para efectos de mejor visualización y ubicación en el tiempo y geográficamente se presentan en los gráficos siguientes:

Figura 1. Año al que corresponden los artículos seleccionados en este estudio



Fuente: Elaborado por los investigadores

Figura 2. Ubicación Geográfica de los países de los cuales se seleccionó lo artículos en estudio



Fuente: Elaborado por los investigadores

CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES

La revisión literaria científica desarrollada, nos direcciona a comprender la importancia que han adquirido, en los últimos años, la Inteligencia Artificial (IA) y sus diversos métodos de aplicación, como vital herramienta en la optimización de diversos procesos operacionales en el sector industrial y empresarial. Las Redes Neuronales Artificiales y su gran capacidad de entrenamiento, representan un método de la inteligencia artificial bastante robusto para automatización de procesos en minería.

Una actividad de vital trascendencia en la minería, lo representa la caracterización geomecánica, es el punto de partida para el desarrollo e implementación de diferentes labores sobre el macizo rocoso, la estabilidad de las estructuras a realizar depende en gran medida de la óptima determinación de la calidad de la roca en la cual se soportarán.

En ese contexto, este estudio nos indica que es perfectamente posible encontrar una armoniosa relación entre el uso de software inteligente, como las redes neuronales, y la adecuada caracterización geomecánica de un macizo rocoso sobre el cual se desarrollan con éxito diversas labores mineras.

REFERENCIAS

- Acevedo M., E., Serna A., A., & Serna M., E. (2016). Principios y características de las redes neuronales artificiales. *Actas de Ingeniería*, 3, 348 - 353.
- Acevedo, E., Serna, A., & Serna, E. (2017). Principios y características de las redes neuronales artificiales. *Actas de Ingeniería*, 348-353.
- de Moya Anegón, F., Herrero Solana, V., & Guerrero Bote, V. (2008). La aplicación de Redes Neuronales Artificiales (RNA) :. España.
- Galán, R., Jiménez, A., Sanz, R., & Matía, F. (2010). Control Inteligente. Asociación Española para la Inteligencia Artificial. *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, 43-48.
- Galvis Carreño, L. V., Ochoa, C., Arguello Fuentes, H., Carvajal Jiménez, J. M., & Calderón Carrillo, Z. H. (2011). Estimación de propiedades mecánicas de. *Ingeniería y Ciencia*, 83 - 103.
- García Benítez, S. R., López Molina, J. A., & Castellanos Pedroza, V. (2016). Neural networks for defining spatial variation of rock properties in. *Sociedad Geológica Mexicana*, 553 - 570.
- Gómez, J., Sánchez, J., Ocampo, A., & Restrepo, J. (2012). Aplicación de las Redes Neuronales en la Clasificación de Arcillas. *Escuela de Ingeniería de Antioquia EIA*, 183-191.

López Molina, J. A., Caballero Ramos, H. N., Montiel Gutiérrez, E., Castellanos Pedroza, V., & García, S. R. (26 y 27 de Mayo de 2016). Armonización de propiedades de macizos rocosos a partir de herramientas experimentales, empíricas e inteligentes. Ciudad de Mexico, Mexico: Amitos.

Perez, M., García, E., Vega, C., Montoya, J., Noriega, P., Alfonso, J., & Cajicá, L. (2018). Comparative study among rock mass classification systems in a Porphyry deposit. *Ciencias de la Tierra*, 34 - 44.