



FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Geológica

“CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA PARA EL DISEÑO DE SOSTENIMIENTO DE TÚNELES EN MINERÍA”: Una revisión de la literatura científica

Trabajo de investigación para optar al grado de:

Bachiller en Ingeniería Geológica

Autores:

Víctor Jorge Alfaro Olascuaga

Sergio Muguerza Anduaga

Asesor:

Ing. Daniel Alejandro Alva Huamán

Cajamarca - Perú

2020

DEDICATORIA

Dedicado con mucho aprecio a nuestros padres y demás familiares que han sido nuestro más grande apoyo y fuente de motivación para realizar este trabajo de investigación.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios por darnos tranquilidad y salud en nuestra etapa universitaria.

A nuestras familias, quienes siempre confiaron en nosotros y respaldaron cada paso que hemos seguido en estos 5 años de formación académica.

También agradecemos con mucho cariño a cada docente de la facultad de ingeniería, quien desinteresadamente han compartido lo mejor de sus conocimientos.

Tabla de Contenidos

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTO.....	3
ÍNDICE DE TABLAS	5
RESUMEN	6
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	11
<i>2.1. Criterios de Elegibilidad.....</i>	<i>11</i>
<i>2.2. Recursos de Información.....</i>	<i>11</i>
<i>2.3. Búsqueda.....</i>	<i>12</i>
<i>2.4. Selección de Estudios.....</i>	<i>13</i>
<i>2.5. Proceso de Recopilación de Datos:</i>	<i>13</i>
CAPÍTULO III. RESULTADOS	15
<i>3.1. Proceso de Selección de Estudios:.....</i>	<i>15</i>
<i>3.2. Análisis Global de los Estudios.....</i>	<i>20</i>
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	24
<i>Discusión</i>	<i>24</i>
<i>Conclusiones.....</i>	<i>25</i>
REFERENCIAS	26

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resultados de búsqueda sistemática.....	15
tabla 2 Cantidad de estudios seleccionados y descartados	20
tabla 3 Pporcentaje de estudios científicos respecto a la base de datos.....	21
tabla 4 Cantidad de estudios por año de publicación.....	21
tabla 5 Cantidad de estudios según el idioma de publicación	22
tabla 6 Porcentaje de estudios según el tipo de publicación.....	22
tabla 7 Porcentaje de estudios en relación al método de caracterización geomecánica	23

RESUMEN

El desarrollo de la minería subterránea es una actividad de alto riesgo, por ello en la actualidad, se da mucha importancia a la evaluación y diseño de soporte de túneles. Para cumplir con este requerimiento los métodos geomecánicos empíricos y sistemáticos asumen un importante rol en el diseño del sistema de soporte de una excavación. El objetivo de esta investigación es presentar un análisis sistemático de literatura para determinar las características geomecánicas de los macizos rocosos para el diseño de sostenimiento de túneles en minería donde se analizaron 24 investigaciones entre los años 2014-2020, a partir de criterios como el tipo de investigación, idioma, año de publicación y metodología. Se recurrió a bases de datos científicos como ProQuest, ScienceDirect, REDALYC y Biblioteca UPN, donde se consideraron investigaciones en los idiomas de español e inglés, que sean publicaciones arbitradas y de texto completo. Los resultados nos indican que para la evaluación y diseño de sostenimientos en túneles se debe de utilizar métodos empíricos como el RMR de Bieniawski, Q de Barton y GSI de Hoek-Brown, además de correlacionarlos con métodos sistemáticos como KF, SPA y TSP; y así determinar el tipo de sostenimiento como shotcrete, pernos de anclaje, marcos de acero.

PALABRAS CLAVES: Caracterización geomecánica, Sostenimiento de túneles, Rock Mass Rating (RMR), Geological Index (GSI), Q de Barton.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

La revisión sistemática que se desarrolla en el presente estudio de investigación científica nos permite analizar, filtrar y sintetizar la información acreditada existente hasta la actualidad en las diversas bases de datos científicas sobre la Mecánica de Rocas aplicada como una técnica sistemática para establecer las características geomecánicas de los macizos rocosos presentes en túneles de labores mineras subterráneas, por medio de la clasificación RMR de Bieniawski, GSI de Hoek-Brown y Q de Barton.

La ciencia de la geomecánica es tal vez una de las técnicas más antiguas del planeta, la historia nos menciona que los griegos y egipcios realizaban análisis de sus macizos rocosos antes de dar inicio a sus colosales obras, como también al iniciar construcciones subterráneas, sin embargo, es recién que a mediados del siglo XX de nuestra actualidad donde se generaliza como una ciencia, dando soporte principalmente a obras subterráneas (Cartaya Pire, 2006).

La geomecánica es un método que ha evolucionado en los últimos años, convirtiéndose en un instrumento de mucha utilidad por la ayuda que brinda en la evaluación de estructuras rocosas para el correcto diseño de sistemas de prevención en la rama de la industria minera, además de otras actividades de la Ingeniería (Córdova Rojas, 2008).

Hoy en día la minería en el Perú se desarrolla principalmente de dos maneras (A cielo abierto y subterráneo), en ambos casos desarrollarlas toma un alto riesgo para los trabajadores mineros. Enfocándonos en la minería subterránea, uno de los riesgos más latentes a la que se enfrentan las unidades mineras es la inestabilidad de los macizos rocosos donde se desarrolla la labor, provocando generalmente desprendimientos de la roca, así como un fallamiento total de un frente o techo si es que no se tiene una evaluación geomecánica y un correcto diseño del soporte del túnel de operación. Esto desencadena consecuencias en el

retraso en el avance de operación, la paralización de la extracción del mineral y sobre todo lo más resaltante es que esto representa un peligro letal para los trabajadores. Es por ello, es preciso cuestionarse: ¿Cuáles son las características geomecánicas de los macizos rocosos para el diseño de sostenimiento de túneles en Minería?, para que de ese modo logremos comprender de manera adecuada el comportamiento de las fuerzas que actúan sobre un macizo rocoso para luego realizar el correcto diseño de sostenimiento, y así prevenir accidentes, retrasos y pérdidas económicas; problemas que presentan la minería subterránea (Saldaña Larrea, 2017) y (Cueva Romero & Arana Cabrera, 2019).

Los métodos de clasificación geomecánica para macizos rocosos son instrumentos de mucha importancia en labores subterráneas, en específico en minería donde los continuos cambios de litología así como la condición en la que se encuentran, sumando al proceso de voladura someten a que los túneles presenten condiciones inestables. Es así que se vuelve prioridad el uso de procedimientos de evaluación, caracterización y diseño de sostenimientos como el refuerzo del macizo rocoso, dando así una mejor estabilidad a las labores subterráneas (Ortega Ramos, Jaramillo Gil, & Molina Escobar, 2016).

Una de las consideraciones de suma importancia en la realización de una excavación subterránea es poder precisar las características y el comportamiento geomecánico del macizo rocoso, ya que si no se tiene en cuenta este tipo de evaluaciones puede ser el inicio de un incidente en el proceso de trabajo, en el sostenimiento del túnel y explotación de estas labores. Pero a pesar de ello, en el país un porcentaje importante no tiene en cuenta la fundamentación acreditada de las características del macizo rocoso (Adeoluwa Olajesu, Noa Monjes, & Quevedo Sotolongo, 2017).

La presencia de problemas de inestabilidad en el macizo rocoso donde se construye un túnel conlleva a la necesidad de indagar sobre estudios científicos con el único fin de

resolver el problema; esta problemática puede ser remediada utilizando clasificaciones geomecánicas como: Bieniawski, Q de Barton, GSI, entre otras evaluaciones que nos permita determinar a través de un índice la caracterización del macizo rocoso y el posible diseño de sostenimiento a emplear para el túnel (Ochoa Quesada, Cartaya Pires, & Blanco Blázquez, 2020).

En tajos mineros de grandes dimensiones, la profundización de este puede conllevar a una reducción en rentabilidad de producción. Por lo que lleva a las empresas mineras a migrar a la extracción de manera subterránea, para el cual deben de diseñar un plan evaluación de la litología, como también de sus características geomecánicas para garantizar la seguridad tanto en la producción como en la estabilidad de los túneles para la seguridad del personal que labore. Las técnicas geomecánicas más usadas para este fin son del RMR de bieniawski y la clasificación GSI de Hoek-Brown (Hergentrether Pérez, 2017).

En estos tiempos es indispensable que la minería subterránea lleve un exhaustivo control geomecánico para la estabilidad de los bloques rocosos. En la mina “Yauricocha” utiliza el “Hundimiento por subniveles” como método de minado el cual causa la inestabilidad del macizo rocoso causando principalmente el desprendimiento de roca y derrumbes el cual lleva a tener accidentes e incidentes en los túneles de minado. Es por eso que se da mucha importancia a la evaluación geomecánica de la roca y el diseño adecuado de los sostenimientos en la mina (Quispe Matos, 2018).

Una de las clasificaciones Geomecánicas más importantes y usadas para la caracterización de macizos rocosos es RMR de Bieniawski, el cual nos permite determinar el índice de calidad de roca de un macizo rocoso basándose en la resistencia que presenta la roca intacta, el RQD (Rock Quality Designation), la separación entre discontinuidades, el estado de las discontinuidades y el nivel de agua presente en el terreno. Se hace un cálculo

donde el RMR puede llegar a tener un valor de 100 puntos o un mínimo de 15, para luego caracterizarlo en 5 categorías de clase y tipo (Bieniawski, 1989).

El índice de Resistencia Geológica “GSI” es uno de los métodos geomecánicos más usados y preferidos para realizar la clasificación de las propiedades de macizos rocosos en minería subterránea, ya que es un método fácil de aplicar y con solo visualizar la roca en campo. Este mecanismo se diferencia del RMR Y Q de Barton por tener como base y fin de realizar una valoración cualitativa. Para poder medir el GSI tenemos que hacer uso de una tabla de doble entrada, donde tenemos que tener en cuenta las condiciones de superficie y la estructura de la roca (Hoek & Brown, 1980).

El Q de Barton es un método geomecánico tan importante como RMR de Bieniawski y el GSI de Hoek-Brown para analizar las características de macizos rocosos, pero es el Q de Barton el que se aplica principalmente en la evaluación de macizos rocosos para el diseño y sostenimiento de túneles. Este método tiene rangos de valores de 001 a 1000 que dan 9 tipos de características a la roca, para poder determinar el rango se calcula midiendo 6 parámetros: el RQD (Rock Quality Designation), J_n (índice de diaclasado), J_r (Índice de rugosidad de las discontinuidades), J_a (índice de alteración de las discontinuidades), J_w (Factor de reducción por la presencia de agua) y el SRF (Condiciones tensionales de la roca); para luego aplicar la fórmula de Q (Barton, 2000).

Considerando los estudios mencionados en líneas anteriores, nos formulamos la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuáles son las características geomecánicas de los macizos rocosos para el diseño de sostenimiento de túneles en Minería?, para poder responder a esta interrogante de la revisión sistemática nos planteamos como objetivo principal: Determinar las características geomecánicas de los macizos rocosos para el diseño de sostenimiento de túneles en minería.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

El presente estudio de investigación se efectuó con base en una revisión sistemática de literatura científica, se analizó, filtró y recopiló información o evidencia relacionada con la “Caracterización geomecánica para el diseño de sostenimiento de túneles en minería”, respondiendo a la pregunta de investigación: ¿Cuáles son las características geomecánicas de los macizos rocosos para el diseño de sostenimiento de túneles en Minería?

2.1. Criterios de Elegibilidad

Para que la información o evidencia revisada sea seleccionada como apta, fue necesario aplicar ciertos filtros o criterios, logrando así que la información recolectada sea estrictamente relacionada con la pregunta de investigación y que publicaciones científicas arbitradas y con texto completo; también tomamos en cuenta que la información obtenida debía estar en el idioma inglés o español. Por otro lado, un filtro importante fue la delimitación de la información por fechas, considerando artículos publicados desde el año 2014 hasta el año 2020. Los documentos que fueron considerados para su análisis están conformadas por investigaciones científicas presentadas como artículos y tesis académicas procedentes de las distintas universidades del mundo.

2.2. Recursos de Información

En la presente revisión sistemática se consideró trabajar con la información que nos brindan 4 bases de datos científicas distintas. A continuación, una breve descripción de cada una de estas:

- **ProQuest:** Es una base de datos multidisciplinaria que brinda una variedad de información científica actualizada y arbitrada de temas relacionados con la economía, ciencias de la salud, educación, arte, ciencia, tecnología e

ingeniería; además de brindar el acceso a revistas especializadas, tesis, papers entre otros (ProQuest, 2010).

- **ScienceDirect:** Es una base de datos de investigación científica, la cual nos proporciona el acceso a más de 2500 revistas de índole científico, con información detallada, textos completos e información más actualizada donde podemos encontrar temas relacionados con las ciencias físicas e ingeniería, ciencias de la salud y biológicas (RELX, 2020).
- **REDALYC:** Es una red de revistas científicas de América Latina, siendo un proyecto propuesto y realizado por la Universidad Autónoma de Estado de México (UAEM). La propuesta de esta página fue crear, diseñar y mantener una hemeroteca virtual con contenido científico impulsando la accesibilidad de la nueva información en un solo sitio web (Redalyc, 2002).
- **Biblioteca UPN:** La biblioteca virtual de UPN es un intermediario entre el usuario, en este caso nosotros y la información que necesitamos, esta biblioteca virtual cuenta con un total de 26 distintas bases de datos que facilitan mucho la búsqueda de información (Universidad Privada del Norte, 2013).

2.3. Búsqueda

Para realizar la búsqueda de la información necesaria, utilizamos las siguientes palabras clave: Estabilidad de túneles en minería (Stability of tunnels in mining) y Geomecánica de macizos rocosos (Geomechanics of rocky massifs). Se buscó información de revistas y publicaciones de artículos científicos utilizando principalmente el idioma español y como idioma secundario el inglés; y trabajamos en un rango de antigüedad de 6 años (2014-2020).

2.4. Selección de Estudios

En la selección de estudios se tuvieron en cuenta los diversos filtros para que la búsqueda no sea tan amplia.

- En ProQuest, se obtuvieron 103 artículos científicos en relación con nuestro tema de investigación, de los cuales 43 estaban dentro de las fechas límites y se escogieron 6 artículos de esta base de datos por su relación directa con la pregunta de investigación.
- En ScienceDirect, se encontraron 169 artículos científicos relacionados con nuestro tema de investigación, de los cuales 66 se encuentran dentro del rango de fechas y se escogieron a 8 de esta base de datos por su relación directa con la pregunta de investigación.
- En Redalyc, se obtuvieron 58 publicaciones académicas, de las cuales fueron seleccionadas 23 por estar dentro de las fechas límites y se escogieron 4 artículos de esta base de datos por su relación directa con la pregunta de investigación.
- En la biblioteca virtual UPN se encontró 110 artículos relacionados con nuestro tema de investigación, de los cuales 48 se encuentran dentro del rango de fechas y se escogieron a 6 de esta base de datos por su relación directa con la pregunta de investigación, además de no repetirse en las otras bases de datos.

2.5. Proceso de Recopilación de Datos:

Para la selección de datos se realizó un Excel con los siguientes aspectos: palabras clave, base de datos, autor, año, país, resumen y tipo de investigación; con lo que se realizó

una síntesis propia de la información recolectada y se expone en el capítulo de resultados en

la tabla 01.

CAPÍTULO III. RESULTADOS

3.1. Proceso de Selección de Estudios:

Para llevar una correcta selección de estudios científicos, se tuvo que aplicar una variedad de filtros de elegibilidad como: fecha de publicación entre los años 2014 a 2020, que sean publicaciones científicas arbitradas y con texto completo, que sean expuestas en el idioma español como inglés, que guarde relación directa con el tema de investigación y principalmente que dé objeción a la pregunta de investigación.

En la siguiente tabla 1, se resume las 24 publicaciones científicas que han sido recolectadas, filtradas y seleccionadas con enfoque al tema y dando respuesta a la pregunta de investigación; se detalla el autor, año, base de datos, DOI y resumen.

Tabla 1

Resultados de búsqueda sistemática

Autor	Año	Base de datos	DOI	Resumen
Rehman, y otros.	2018	ProQuest	10.3390/pp8081250	En su artículo se realiza una revisión de los sistemas de clasificación de macizos rocosos y de su índice de calidad del túnel para su posterior diseño. Se clasificó en siete clases y se correlacionan entre sí.
Xin, P H S W Kulatilake, & Sandbak.	2018	ProQuest	10.1007/s00603-017-1336-6	Se analiza la estabilidad del macizo rocoso de un túnel de una mina subterránea en USA, e desarrolló un modelo tridimensional basado en la información geológica, Las propiedades de la masa de roca se estimaron utilizando las ecuaciones de Hoek-Brown basadas en las propiedades de roca intacta y los valores de RMR.
Santos, Da Silva, & M Graga.	2018	ProQuest	10.3390/min8030078	Durante las excavaciones subterráneas las variaciones en la masa rocosa la calidad es importante, especialmente para el diseño del soporte más adecuado. Para ello el método más usado es el RMR para analizar los macizos rocosos y lograr el sostenimiento y avance de los túneles.

Lin, y otros.	2019	ProQuest	10.1007/s10706-018-0471-5	<p>Proponen un método para predecir con precisión la clasificación de rocas circundantes en función del análisis de pares de conjuntos (SPA) y predicción sísmica de túnel (TSP), con sus características de respuesta del campo de ondas sísmicas, y su membresía las funciones se proponen usando frecuencia estadística método.</p>
Vanuva & Jaya.	2016	ProQuest	10.2478/ace-2018-0002	<p>Se analiza y compara el diseño y tipo de sostenimiento del túnel Tamil Nadu, basándose y métodos cuantitativos de calidad de la masa rocosa (Q), calificación de la masa rocosa de Bieniawski y PLAXIS-2D Numerical modelado.</p>
Rehman, Naji, Jung-joo, & Han-kyo.	2020	ProQuest	10.3390/app8050782	<p>Se presenta una evaluación de clasificación de macizos rocosos para el índice de calidad de un túnel y su diseño de soporte basándose en modelos empíricos como el índice de masa de roca (RMR) y el sistema de índice de calidad de túnel (Q), además se realiza una evaluación de las diferentes correlaciones entre RMR y Q a través de los datos publicados indican que el índice de tejido de masa de roca da resultados comparativamente mejores.</p>
Rahimi, Shahriar, & Sharifzadeh.	2014	ScienceDirect	10.1016/j.tust.2013.12.010	<p>El objetivo de esta investigación es proporcionar una metodología para seleccionar un enfoque de diseño apropiado basado en el comportamiento del suelo y el factor de continuidad en los túneles. En la mayoría de los casos, la estimación de los parámetros de la masa rocosa y los esfuerzos in situ utilizando RMR, Q, peso de soporte y SRC se emplearon como métodos de diseño de soporte de túnel empírico.</p>
Akgün, Muratli, & Kerem.	2014	ScienceDirect	10.1016/j.tust.2013.10.018	<p>Este estudio abarca investigaciones geotécnicas, evaluaciones de estabilidad y diseño de los sistemas de soporte preliminares para el túnel, La clasificación de la masa rocosa de los terrenos del túnel se realizó utilizando el método RMR, el sistema Q, el NATM y la clasificación del Índice de Fuerza Geológica (GSI). Se identificaron las inestabilidades estructuralmente controladas dentro de las secciones del túnel. Se aplicó un modelo de caracterización numérico para corroborar los métodos de caracterización y soporte.</p>

Niedbalski, Piotr, & Majcherczyk.	2018	ScienceDirect	10.1016/j.tust.2018.01.003	<p>Los índices de calidad de masa de roca RMR, GSI y KF (clasificación polaca del flysch de los Cárpatos) mostraron discrepancias significativas que demuestran una alta subjetividad de los métodos en la condición de formación de flysch. Simultáneamente, el análisis ha demostrado que la clasificación KF puede aplicarse con éxito en la masa de roca flysch, junto con las clasificaciones RMR y GSI.</p>
Jie liu, Xing-dong, Shu-Jing, & Lian-Ku.	2018	ScienceDirect	10.1016/j.tust.2017.08.013	<p>El objetivo de este estudio es proporcionar un diseño de soporte sólido para una instalación subterránea de almacenamiento. Para obtener las propiedades geotécnicas de rocas intactas y masas de rocas, se llevaron a cabo estudios detallados de campo y laboratorio. Las masas rocosas en tres sitios se caracterizaron en términos de Clasificación de la masa rocosa (RMR), Calidad de la masa rocosa (Q-sistema) e Índice de Fuerza Geológica (GSI), y luego se estimaron las propiedades de masa rocosa de las cavernas subterráneas, en consecuencia.</p>
Özkan, Erdem, & Ceulanoglu.	2015	ScienceDirect	10.1016/j.ijrms.2014.10.001	<p>En la mina de hierro a cielo abierto Divriği en Turquía, el mineral extraído se aplasta inicialmente en una cámara subterránea. Para garantizar la estabilidad de la cámara inicialmente, los sistemas originales de clasificación de masa de roca (RMR) y calidad (Q) se usaron para la caracterización de la masa de roca, pero se experimentaron dificultades para determinar una serie de parámetros. En este documento, los sistemas de clasificación de masas de roca originales (RMR y Q) y modificados (M-RMR) se comparan en una discusión detallada de nuestros resultados.</p>
Panda, Mohanty, Pingua, & Mishra.	2014	ScienceDirect	10.1016/j.enggeo.2014.08.022	<p>Se llevó a cabo una investigación de las propiedades geológicas de ingeniería y los parámetros geotécnicos de las masas rocosas a lo largo de un túnel, para analizar las propiedades de la masa rocosa se llevaron a cabo con los sistemas Q, RMR y RMi como métodos empíricos de diseño del soporte del túnel.</p>

McQueen , Purwodihard jo, & Barrett	2019	ScienceDirect	10.1016/j. jrmge.201 9.02.001	Este artículo explora las implicaciones potenciales del pensamiento reciente en relación con la resistencia de la masa rocosa para futuros proyectos de túneles, durante los últimos 12 años, la fuerza de las masas de roca más masivas para el análisis continuo se ha estimado mediante la aplicación del criterio de falla de Hoek-Brown (HB) utilizando el índice de resistencia geológica (GSI).
Bertuzzi	2017	ScienceDirect	10.1016/j. jrmge.201 7.05.005	Las relaciones empíricas entre las cualidades de la masa rocosa, es decir, RQD, RMR, Q, GSI u otra medida, es un ejercicio de datos de ajuste de curvas.
Adeoluwa Olajesu, Noa Monjes, & Quevedo Sotolongo.	2017	Redalyc	https://w ww.redal yc.org/arti culo.oa?id =2235532 49007	En la mina subterránea Oro Descanso se evaluó el macizo rocoso teniendo en cuenta el agrietamiento y bloqueidad de este, con el fin de proponer medidas de laboreo seguro. Después de evaluar y clasificar el macizo rocoso se encontró que hay una variedad de calidad en dicho macizo teniendo macizo de buena, regular y mala calidad.
Chura Lopez.	2016	Redalyc	http://repo sitorio.un ap.edu.pe/ handle/U NAP/448 9	En el departamento de Puno, provincia de San Antonio de Putina, distrito de Ananea se evaluó el comportamiento mecánico del macizo rocoso circundante con el proyecto de la roca pizarra y cuarcita, con el fin de clasificar dicho macizo y tener una idea más clara del soporte más adecuado aplicable.
Castro Caicedo & Pérez Pérez.	2014	Redalyc	https://w ww.redal yc.org/pdf /1695/169 53007500 5.pdf	Durante la excavación de un túnel piloto de 8.55 Km se realizó una evaluación y del macizo rocoso para obtener resultados de RMR y Q de Barton, estos datos se evaluaron con criterios geotécnicos y geológicos para que después mediante análisis estadísticos obtengamos la calidad del macizo concluyendo que son aceptables.
Blanco Moreno & Cepeda Gómez.	2015	Redalyc	http://repo sitorio.ud es.edu.co/ handle/00 1/2919	En este trabajo se presenta la comparación de dos métodos y sus diferentes parámetros frente a la misma situación usando así el método de RMR y Q de Barton y estos se comparan con el método chino "Basic Quality" BQ.
Narvaez Mejia.	2018	Biblioteca virtual UPN	http://repo sitorio.un sam.edu. pe/handle/	"El objetivo del presente trabajo consiste en realizar una caracterización geomecánica de la galería del manto de carbón San Roque con el fin de analizar y

Claderón Mena.	2018	Biblioteca virtual UPN	UNASA M/3352 http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/8409	plantear el tipo de sostenimiento dependiendo de la calidad del macizo Rocoso." "El estudio se realizó en la galería Gavilán de Oro de la UEA Ana María ubicado en el distrito de Ananea, provincia de San Antonio de Putina, departamento de Puno, Perú; en esta galería se encontraron varias zonas de debilidad durante su periodo de desarrollo en los últimos meses del 2016, esta debilidad se presentó por rocas agrietadas y varios bloques de roca colgados arriesgando así el trabajo de mucho personal, debido a esto se decide evaluar el macizo de esta galería en base al RMR."
Alcántara Urrutia, Pacheco Ccapa, & Salazar Cacho.	2018	Biblioteca virtual UPN	http://hdl.handle.net/11537/15032	Este estudio recopila información de información previa sobre mecánica de rocas para la clasificación del macizo rocoso y el sostenimiento para túneles en minería y como túneles vehiculares. Para esto aplicamos RMR Y GSI.
Cipriano Chudán & Marín Cabrera.	2018	Biblioteca virtual UPN	http://hdl.handle.net/11537/13943	El principal inconveniente de la excavación de un túnel es inestabilidad que puede presentar el macizo rocoso, debido a esto se aplican técnicas de evaluación usando el RMR, Q y GSI para determinar un sostenimiento óptimo para el macizo el rocoso.
Soto Vilca.	2016	Biblioteca virtual UPN	http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/2996	Este trabajo se presentó por la elaboración de un túnel y tratar de optimizar la vida útil de este, para esto se realiza una evaluación geomecánica para determinar un sostenimiento óptimo de 50 años de vida útil.
Cruz Ordoñez.	2019	Biblioteca virtual UPN	http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/12381	"El objetivo de la presente investigación es el planeamiento y diseño de sostenimiento más adecuado mediante un enfoque de análisis numéricos y métodos empíricos de la clasificación geomecánica en el Proyecto Tambomayo. Que permitirá establecer algunas pautas sencillas de diseño que pueden facilitar futuras estimaciones de sostenimiento"

Basándonos en las investigaciones científicas descritas en la tabla 01, se procederá a exponer los resultados de la investigación.

3.2. Análisis Global de los Estudios

Para reportar el análisis global de los resultados se consideró todos los criterios de clasificación especificados en el capítulo de metodología.

Tabla 2

Cantidad de estudios seleccionados y descartados

Base de datos	Estudios seleccionados	Estudios descartados	Total
ProQuest	6	97	103
ScienceDirect	8	161	169
Redalyc	4	54	58
Biblioteca virtual UPN	6	104	110
Total	24	416	440

En la base de datos ProQuest se encontraron 103 publicaciones académicas, de las cuales pasaron los filtros y se consideraron como aptas para la investigación 6; en la base de datos ScienceDirect se identificaron 169 publicaciones académicas, de las cuales pasaron los filtros y se consideraron como aptas para la investigación 8; en la base de datos Redalyc se encontraron 58 publicaciones académicas, de las cuales pasaron los filtros y se consideraron como aptas para la investigación 4; en la base de datos de la Biblioteca Virtual UPN se identificaron 110 publicaciones académicas, de las cuales pasaron los filtros y se consideraron como aptas para la investigación 8. Finalmente, luego de pasar los filtros de selectividad se obtuvieron 24 investigaciones científicas y se descartaron 416 por motivos que no pasaron los filtros puestos, no tener relación directa con el tema de investigación y duplicidad entre base de datos.

Tabla 3

Porcentaje de estudios científicos respecto a la base de datos

Base de datos	Estudios	Porcentaje
ProQuest	6	25%
ScienceDirect	8	33.3%
Redalyc	4	16.7%
Biblioteca virtual UPN	6	25%
Total	24	100%

La base de datos donde más estudios científicos se obtuvieron fue la base de datos ScienceDirect con 8 estudios seleccionados, ocupando así el 33.3% del total; seguido esta ProQuest, con 6 estudios seleccionados y ocupando el 25% del total; al igual que el anterior encontramos la base de datos de la Biblioteca Virtual UPN, donde encontramos 6 estudios ocupando un 25% del total; finalmente encontramos la base de datos Redalyc, donde se obtuvieron 4 estudios, ocupando 16.7% del total

Tabla 4

Cantidad de estudios por año de publicación

Año de publicación	Cantidad de estudios
2014	4
2015	2
2016	3
2017	2
2018	9

2019	3
2020	1
Total	24

En la tabla 4 se expone los estudios seleccionados por año de publicación, que van desde el 2014 hasta el 2020 de forma ascendente; notamos que tiene una tendencia mayor de publicación en el año 2018 y una menor tendencia de publicación en el año 2020.

Tabla 5

Cantidad de estudios según el idioma de publicación

Idioma	Cantidad de estudios
Español	10
Inglés	14
Total	24

En la tabla 5 se muestra la cantidad de estudios encontrados en los idiomas seleccionados, inglés y español, respectivamente. Donde identificamos una notoria cantidad de estudios publicados en el idioma inglés con 14 investigaciones, y en el idioma español solo 10 investigaciones publicadas.

Tabla 6

Porcentaje de estudios según el tipo de publicación

Tipo de publicación	Cantidad de estudios	Porcentaje
Artículo científico	16	66.7%
Tesis académicas	8	33.3%
Total	24	100%

Podemos notar que los estudios académicos que predominan como fuente de información para responder la pregunta de investigación son los artículos científicos con el 66.7%, tesis académicas con 33.3%.

Tabla 7

Porcentaje de estudios en relación al método de caracterización geomecánica

Método de caracterización	Cantidad de estudios	Porcentaje
RMR	9	37.5%
Q de Barton	6	25%
GSI	6	25%
Otros	3	12.5%
Total	24	100%

En la tabla 7 se muestra el porcentaje de preferencia de los estudios académicos según el método de evaluación geomecánica de macizos rocosos en minería subterránea. Para un 37.5% investigaciones el método más usado y eficaz es el RMR, teniendo correlación con el método Q de Barton en algunos casos; mientras que para 25% investigaciones el método más usado y eficaz es el Q de Barton, teniendo como correlación tanto a RMR y GSI; del mismo modo un 25% de investigaciones menciona que utiliza el método GSI como método geomecánico; finalmente un 12.5% nos indica que utiliza métodos no tan convencionales y/o nuevos pero que correlacionan sus resultados con los métodos mencionados.

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Discusión

La revisión de la literatura científica nos lleva a la búsqueda de información en el periodo de años de 2014 a 2020, donde se han seleccionado 24 investigaciones arbitradas de carácter mundial. Con lo que analizamos y discutimos los hallazgos principales en las siguientes líneas.

El principal inconveniente en la excavación de un túnel es la inestabilidad de los bloques circundantes a él, para realizar el análisis de las características geomecánicas de un macizo rocoso se recurre a métodos de evaluación geomecánica empíricos como el índice de masa de roca (RMR) el cual es el preferido para la recopilación de los datos en campo, y el sistema de índice de calidad de tu túnel (Q de Barton), además de ser correlacionadas y comparadas entre sí para lograr una notoria mejora en la caracterización del macizo rocoso y así garantizar el correcto sistema de sostenimiento cumpliendo con las normas internacionales de seguridad (Rehman, Naji, Jung-joo, & Han-kyo, 2020), (Rahimi, Shahriar, & Sharifzadeh, 2014), (Vanuva & Jaya, 2016) y (Panda, Mohanty, Pingua, & Mishra, 2014). Del mismo modo para estimar la estabilidad y resistencia del macizo rocoso un metodo utilizado es el Criterio de falla de Hoek & Brown (GSI), con el cual se puede realizar un análisis empírico primario en un corto tiempo para saber las condiciones de la roca insitu (Alcántara Urrutia, Pacheco Ccapa, & Salazar Cacho, 2018), (McQueen, Purwodihardjo, & Barrett, 2019) y (Xin, P H S W Kulatilake, & Sandbak, 2018).

Si se quiere lograr una mejor clasificación e identificar el control estructural de los macizos rocosos para cumplir los estándares de seguridad se expresa la utilización de varios métodos geomecánicos, iniciando con la aplicación de los métodos empíricos clásicos:

RMR, Q de Barton y GSI (Cipriano Chudán & Marín Cabrera, 2018), (Bertuzzi, 2017), (Akgün, Muratli, & Kerem, 2014) y (Jie liu, Xing-dong, Shu-Jing, & Lian-Ku, 2018). Además de aplicar de los métodos clásicos se incita a iniciar la evaluación con métodos más modernos: Clasificación polaca del Flysh (KF), set pair analysis (SPA), Tunnel Seismic Prediction (TSP); y ser comparados como correlacionados en un software especializado como el Dips, Faulkin, Phase 2 (Lin, y otros, 2019) y (Niedbalski, Piotr, & Majcherczyk, 2018).

Conclusiones

La investigación de literatura de la presente revisión sistemática nos lleva a tener una respuesta efectiva frente a la pregunta de investigación, donde se comprendió la importancia de conocer las características geomecánicas de los macizos rocosos para la excavación de un túnel y la proposición de un sostenimiento de acuerdo al resultado obtenido (calidad del macizo rocoso).

Se conoció que la búsqueda por evaluar las características de los macizos rocosos está presente en todo el mundo y es un tema de importancia en la comunidad científica de ingeniería. Además de que las investigaciones encontradas son de carácter internacional por su nivel de arbitrariedad y calidad de resultados.

Se concluye que para la comunidad científica el método más usado para caracterizar macizos rocosos es RMR, seguido por los métodos de Q de Barton y GSI; pero para lograr una mayor exactitud de las características de los bloques de roca se deben utilizar en simultáneo estos métodos empíricos, además de correlacionarlos y compararlos con los análisis de nuevos sistemas de clasificación como KF, SPA, TSP y ser analizados con software especializado para determinar el correcto diseño de sostenimiento en la excavación de un túnel y así garantizar su estabilidad y seguridad.

REFERENCIAS

- Adeoluwa Olajesu, O., Noa Monjes, R., & Quevedo Sotolongo, G. (2017). Caracterización estructural del macizo rocoso de la mina subterránea Oro Descanso. *Minería y Geología*, 33(4), 464-476. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223553249007>
- Akgün, H., Muratli, S., & Kerem, M. (2014). Geotechnical investigations and preliminary support design for the Geçilmez tunnel: A case study along the Black Sea coastal highway, Giresun, northern Turkey. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 40, 277-299. doi:10.1016/j.tust.2013.10.018
- Alcántara Urrutia, L. H., Pacheco Ccapa, R. V., & Salazar Cacho, I. N. (2018). *Caracterización geomecánica para determinar el tipo de sostenimiento en labores subterráneas, Perú-2018*. Universidad Privada del Norte, Cajamarca. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11537/15032>
- Barton, N. R. (2000). Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39, 185-256.
- Bertuzzi, R. (2017). Back-analysing rock mass modulus from monitoring data of two tunnels in Sydney, Australia. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9, 877-891. doi:10.1016/j.jrmge.2017.05.005
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications*. New York: John Wiley.
- Blanco Moreno, D. C., & Cepeda Gómez, D. I. (2015). *Análisis y evaluación comparativa del método chino “Basic Quality” BQ y los métodos “RMR” y “Q” para clasificación de macizos rocosos*. Universidad de Santander, Facultad de Ingenierías, Colombia. Obtenido de <http://repositorio.udes.edu.co/handle/001/2919>
- Calderón Mena, M. A. (2018). *Caracterización geomecánica para la determinación del tipo de sostenimiento en la galería Gavilán de oro de la UEA Ana María*. Universidad Nacional del Altiplano, Perú. Obtenido de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/8409>
- Cartaya Pire, M. (2006). Caracterización geomecánica de macizos rocosos en obras subterráneas de la región oriental del país (resumen de tesis). *Minería y Geología*, 22(3).
- Castro Caicedo, á. J., & Pérez Pérez, D. M. (2014). Correlaciones entre las clasificaciones geomecánicas Q y RMR en el tunel exploratorio de “La Línea”, cordillera central de Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*(34), 42-50. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/1695/169530075005.pdf>
- Chura Lopez, W. (2016). *Caracterización geomecánica del macizo rocoso y su aplicación en el diseño de sostenimiento en labores de desarrollo de la unidad económica*

administrativa Ana María – La Rinconada. Universidad Nacional del Altiplano, Perú. Obtenido de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/4489>

Cipriano Chudán, R. R., & Marín Cabrera, E. E. (2018). *Propuesta de sostenimiento en base a la caracterización geomecánica de la galería NV. 9, unidad Minera Colquirrumi, Cajamarca, 2018*. Universidad Privada del Norte, Perú. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11537/13943>

Córdova Rojas, N. D. (2008). *Geomecánica en el minado subterráneo: caso Mina Condestable*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería. Obtenido de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/595>

Cruz Ordoñez, C. (2016). Estudio comparativo entre requerimiento de soporte y fortificación de túneles definido según métodos empíricos de clasificación geomecánica y análisis numéricos. *Minería y Geología*, 16. Obtenido de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/12381>

Cueva Romero, J. G., & Arana Cabrera, J. A. (2019). *Caracterización geomecánica en minería subterránea”: Una revisión de la literatura científica*. Universidad Privada del Norte, Cajamarca. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11537/15035>

Hergenrether Pérez, P. D. (2017). *Consideraciones geomecánicas en el diseño de secciones tipo para un túnel minero*. Universidad de Oviedo, España. Obtenido de <http://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/43716>

Hoek, E., & Brown, E. (1980). *Underground Excavations in Rock*. London: The Institution of mining and metallurgy.

Jie liu, Xing-dong, Z., Shu-Jing, Z., & Lian-Ku, X. (2018). Analysis of support requirements for underground water-sealed oil storage cavern in China. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 71, 36-46. doi:10.1016/j.tust.2017.08.013

Lin, B., Shu-cai, L., Shao-shuao, S., Xiao-kun, X., Li-Ping, Zong-Qing, Z., & Zhi-jie, W. (2019). A New Advance Classification Method for Surrounding Rock in Tunnels Based on the Set-Pair Analysis and Tunnel Seismic Prediction System. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(4), 2403-2413. doi:10.1007/s10706-018-0471-5

McQueen, L. B., Purwodihardjo, A., & Barrett, S. V. (2019). Rock mechanics for design of Brisbane tunnels and implications of recent thinking in relation to rock mass strength. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11, 676-683. doi:10.1016/j.jrmge.2019.02.001

Narvaez Mejia, J. E. (2018). *Caracterización geomecánica del manto de carbón San Roque para el diseño y selección del tipo de sostenimiento de galerías, Cia minera San Roque FM*. Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Perú. Obtenido de <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/3352>

Niedbalski, Z., Piotr, M., & Majcherczyk, T. (2018). Application of the NATM method in the road tunneling works in difficult geological conditions – The Carpathian flysch.

Tunnelling and Underground Space Technology, 74, 41-59.
doi:10.1016/j.tust.2018.01.003

- Ochoa Quesada, A., Cartaya Pires, M., & Blanco Blázquez, J. L. (2020). Optimal geomechanical classification for evaluating the rock mass from coalface Section IV of Levisa-Mayarí tunnel. *Minería y Geología*, 36(1), 50-64.
- Ortega Ramos, C. A., Jaramillo Gil, A. F., & Molina Escobar, J. M. (2016). Drilling grid blasting upgrading based on Geological Strength Index (GSI), case "La Maruja" mine, Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 0(40), 32-38. doi:10.15446 / rbct.n40.52199
- Özkan, I., Erdem, B., & Ceulanoglu, A. (2015). Characterization of jointed rock masses for geotechnical classifications utilized in mine shaft stability analyses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 73, 28-41. doi:10.1016/j.ijrmms.2014.10.001
- Panda, M. K., Mohanty, S., Pingua, B. M., & Mishra, A. K. (2014). Engineering geological and geotechnical investigations along the head race tunnel in Teesta Stage-III hydroelectric project, India. *Engineering Geology*, 297-308. doi:10.1016/j.enggeo.2014.08.022
- ProQuest LLC. (2020). *ProQuest*. Obtenido de <https://www.proquest.com/LATAM-ES/es-products-services/>
- Quispe Matos, K. (2018). *Evaluación geomecánica para la elección del tipo de sostenimiento en el túnel Yauricocha del NV. 720*, Sociedad Minera Corona S.A. Universidad Continental, Perú. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12394/4685>
- Rahimi, B., Shahriar, K., & Sharifzadeh, M. (2014). Evaluation of rock mass engineering geological properties using statistical analysis and selecting proper tunnel design approach in Qazvin–Rasht railway tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 41, 206-222. doi:10.1016/j.tust.2013.12.010
- Redalyc. (octubre de 2002). *Psi Uba*. Obtenido de Psi Uba: http://www.psi.uba.ar/institucional/red_editores/archivos/redalyc.pdf
- Rehman, H., Naji, A. M., Jung-joo, K., & Han-kyo, Y. (2020). Empirical Evaluation of Rock Mass Rating and Tunneling Quality Index System for Tunnel Support Design. *Applied Sciences*, 8(5). doi:10.3390/app8050782
- Rehman, H., Wahid, A., Naji, A. M., Jung-joo, K., Rini, A. A., & Han-kyu Yoo. (2018). Review of Rock-Mass Rating and Tunneling Quality Index Systems for Tunnel Design: Development, Refinement, Application and Limitation. *Applied Sciences*, 8(8). doi:10.3390/app8081250
- RELX. (2020). *ELSEVIER*. Obtenido de <https://www.elsevier.com/solutions/sciencedirect>

- Saldaña Larrea, T. (2017). *Evaluación y plan de mejora de las principales causas de accidentes en minería subterránea a pequeña escala: MPE (Artesanal y pequeña minería): caso de estudio, minera Yanaquihua S.A.C.* Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12404/8029>
- Santos, V., Da Silva, P., & M Graga, B. (2018). Estimating RMR Values for Underground Excavations in a Rock Mass. *Minerals*, 8(3), 78. doi:10.3390/min8030078
- Soto Vilca, A. C. (2016). *Diseño de sostenimiento en el túnel Wayrasencca - Ollachea.* Universidad Nacional del Altiplano, Perú. Obtenido de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/2996>
- Universidad Privada del Norte. (2013). Obtenido de <https://www.upn.edu.pe/preguntas-frecuentes/centros-de-informacion>
- Vanuva, M., & Jaya, K. P. (2016). Design Analysis of an Underground Tunnel in Tamilnadu. *Archives of Civil Engineering*, 64(1), 21-39. doi:10.2478/ace-2018-0002
- Xin, Y., P H S W Kulatilake, & Sandbak, L. A. (2018). Investigation of Rock Mass Stability Around the Tunnels in an Underground Mine in USA Using Three-Dimensional Numerical Modeling. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51(2), 579-597. doi:10.1007/s00603-017-1336-6