

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATÓLICA DEL PERÚ**

Escuela de Posgrado



Impacto de la transformación digital en la minería subterránea
peruana

Trabajo de investigación para obtener el grado académico de Maestro en
Regulación, Gestión y Economía Minera
que presenta:

José Javier Condori Lozano

Asesor:

Emilio Gómez de la Torre Gutiérrez

Lima, 2023

Informe de Similitud

Yo, Emilio Gómez de la Torre Gutierrez, docente de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado

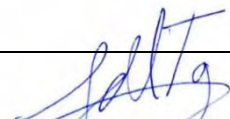
Impacto de la transformación digital en la minería subterránea peruano, del/de la autor(a) / de los(as) autores(as)

José Javier Condori Lozano dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 5%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 15/06/2023.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha:

Lima, 11 de julio 2023

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: Gómez de la Torre Gutierrez, Emilio	
DNI: 42240563	Firma 
ORCID: 0000-0002-1181-3379	

RESUMEN

En la actualidad se ha notado un evidente cambio en lo concerniente a la transformación digital de procesos productivos a raíz de la cuarta revolución industrial, así como el COVID-19, que han evidenciado como el trabajo remoto y la optimización de procesos influyen en gran medida dentro de la productividad. El sector minero no es la excepción, ya que, en países como Chile, Europa y Canadá, cuentan con operaciones automatizadas, evitando riesgos y daños a la salud de los trabajadores. Es así que la minería subterránea al ser un método ampliamente difundido y aplicado en la actividad minera del Perú presenta desafíos frente al método tradicional, por lo que aún no se evidencia grandes avances tecnológicos. Es por ello que, la presente investigación es un estudio del impacto de la transformación digital en la productividad de la minería subterránea peruana que, para ello, se diagnosticaron las principales ventajas y desventajas de este tipo de minería en el territorio peruano; se examinaron los desafíos de las tecnologías de la minería subterránea para que puedan ser empleadas y se analizó un caso de estudio para establecer el impacto de la tecnología. Además, tiene como objetivo mejorar la productividad de la empresa estudiada. La hipótesis planteada en este análisis es que la implementación de tecnología enfocada en transformación digital incrementa la productividad en la minería subterránea. Con base en el caso de estudio se concluye que la minería subterránea, dentro de la empresa NEXA, ha notado como la transformación digital ha representado un control e incremento de la producción.

Palabras clave: minería subterránea, Indicadores Clave de Rendimiento, transformación digital, NEXA.

ABSTRACT

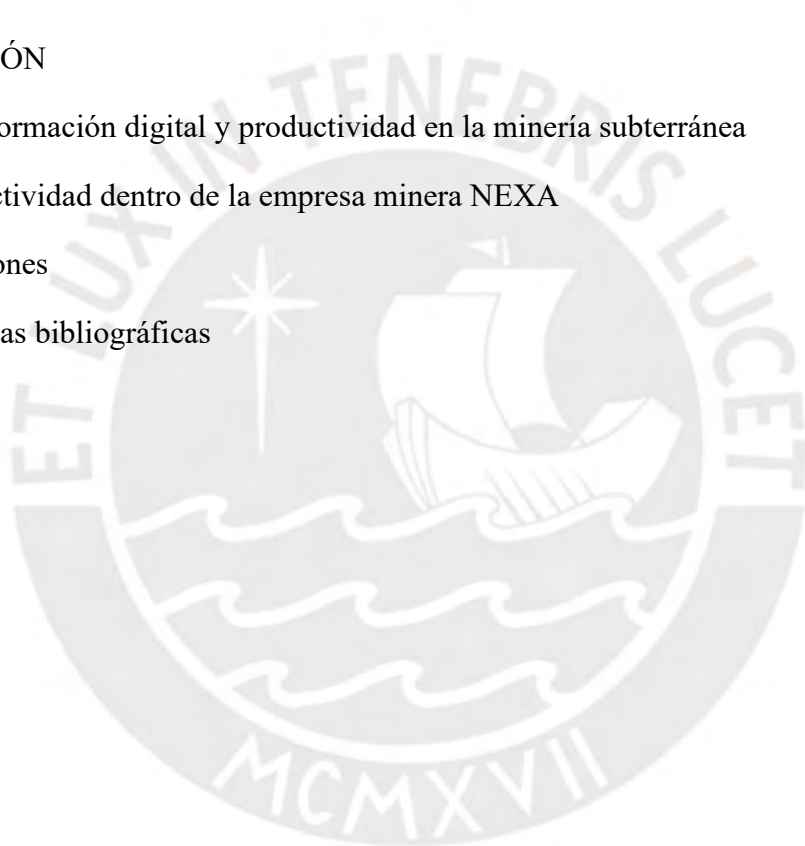
Currently, an evident change has been noticed regarding the digital transformation of production processes as a result of the fourth industrial revolution, as well as COVID-19, which have shown how remote work and process optimization greatly influence in productivity. The mining sector is no exception, since in countries like Chile, Europe and Canada, they have automated operations, avoiding risks and damage to the health of workers. Thus, underground mining, being a method widely disseminated and applied in mining activity in Peru, presents challenges compared to the traditional method, so great technological advances are not yet evident. That is why this research is a study of the impact of digital transformation on the productivity of Peruvian underground mining, for which the main advantages and disadvantages of this type of mining in Peruvian territory were diagnosed; The challenges of underground technologies so that they can be used were examined and a case study was analyzed to establish the impact of the technology. In addition, it aims to improve the productivity of the company studied. The hypothesis raised in this analysis is that the implementation of technology focused on digital transformation increases productivity in underground mining. Based on the case study, it is concluded that underground mining, within the NEXA company, has noticed how the digital transformation has represented a control and increase in production.

Keywords: underground mining, Key Performance Indicators (KPI'S), digital transformation, NEXA.

ÍNDICE

	Pág.
RESUMEN	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE	iv
Lista de tablas	vi
Lista de figuras	vii
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II	6
ESTADO DEL ARTE	6
2.1. Aspectos generales de la minería y tipos de minería	6
2.1.1. Minería superficial	10
2.1.2. Minería subterránea.....	12
2.2. Principales ventajas y desventajas de la minería subterránea	15
2.3. Cadena de valor en la minería subterránea	17
2.4. Productividad en la industria	19
2.5. Tecnologías empleadas dentro de la minería subterránea	20
2.6. Tecnología y el impacto en la productividad	25
2.7. La tecnología como elemento para incrementar la productividad	27
CAPÍTULO III	29
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	29
3.1. Situación actual de la minería subterránea en el Perú	29
3.2. Desafíos de la minería subterránea en el sector productivo del Perú	34
3.3. Productividad de la minería subterránea en el Perú	38

3.4.	Tecnología aplicada actualmente en la minería subterránea peruana	39
3.5.	Caso de estudio	42
3.5.1.	Productividad de la operación	42
3.5.2.	Tecnología empleada	47
3.5.3.	Transformación digital	48
3.5.4.	Costos de operación	51
	CAPÍTULO IV	53
	DISCUSIÓN	53
4.1.	Transformación digital y productividad en la minería subterránea	53
4.2.	Productividad dentro de la empresa minera NEXA	54
	Conclusiones	58
	Referencias bibliográficas	60



Lista de tablas

Tabla 1. Porcentaje de inversión de proyectos de exploración de minerales (2020) 30

Tabla 2 Principales KPIs empresa minera NEXA 2021 43



Lista de figuras

Figura 1	Cartera de proyectos de exploración minera	31
Figura 2	Las empresas mineras solo usan una pequeña parte de los datos que generan	35
Figura 3	Recursos mineros de Perú en porcentaje	38
Figura 4	Productividad laboral en el Perú del 2005 a 2014.....	39
Figura 5	KPI de Extracción de Mineral (ton)	44
Figura 6	KPI de Avances mina (m)	45
Figura 7	KPI de Perforación de Taladros largos (m).....	46
Figura 8	Reporte en Excel de la empresa minera NEXA	49
Figura 9	Centro de control automatizado de la empresa minera NEXA	50
Figura 10	Costos de operación mina Cerro Lindo año 2021	51
Figura 11	Costos de operación mina Cerro Lindo año 2022	52

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La minería es el principal sector utilizado para la obtención de materiales empleados en las diferentes actividades de la sociedad que, dependiendo de los mismos, se aprovechan en varios procesos productivos como la construcción, joyería, fabricación de equipos eléctricos, entre otros (Kalisz *et al.*, 2022). Es así que, para ejecutar esta actividad, previamente se deben identificar cada una de las características decisivas para la explotación, debido a que las condiciones para la extracción no son iguales en cada mina, ya que dependen del tipo de mineral, orientación del yacimiento o la geología subterránea (Amoroso & Orellana, 2019). Es por ello que esta rama de la ingeniería considera varios aspectos técnicos al momento de toma de decisiones durante el diseño debido a que son cruciales para el proyecto, pero también se evidencia que existe una brecha con la aplicación tecnológica, principalmente por la optimización del proceso en las minas (Chung *et al.*, 2022).

En este marco se distinguen dos tipos de minería la superficial y la subterránea, siendo la primera la explotación del sitio desde la superficie a niveles inferiores y la segunda por medio de piques o túneles se recolectan los minerales de la corteza terrestre. La elección depende principalmente por el tipo de yacimiento que se presente y luego de realizar estudios geológicos y geotécnicos. (Espinosa & Hormaechea, 2021). La minería subterránea (MST) es reconocida como un método de explotación que busca desarrollar técnicas de construcciones subterráneas con el objetivo de alcanzar zonas mineralizadas profundas, que, de otro modo, serían inalcanzables.

Además, la MST es empleada cuando en la superficie se dificulta poner en marcha la operación principalmente por afecciones al ambiente o resulta económicamente poco viable la ejecución de un proyecto (Marimuthu *et al.*, 2021). Es por ello que este tipo de minería es una opción a priorizar para la reducción de impactos ambientales provenientes de este sector productivo. La ventaja principal es que es eficiente por ser un método más selectivo para la obtención de mineral que se encuentra a gran profundidad y ambientalmente reducen la contaminación porque existe baja interacción a diferencia del método superficial (Sarupria *et al.*, 2019).

Actualmente los procesos productivos a nivel mundial se encuentran dentro de la cuarta revolución industrial, un espacio donde las ramas de las ciencias se interrelacionan con la tecnología para optimizar procesos (Schwab, 2020). Es así que, ante el incremento y desarrollo de la tecnología, sumada a la pandemia de COVID 19, resaltó más aun la importancia del trabajo remoto, transformación digital, optimización de procesos y la asistencia no presencial. Es por ello que la tecnología actual ha desarrollado maquinarias que requieren solo de vigilancia, su operación es automática y están diseñadas para laborar a grandes profundidades (Afum *et al.*, 2020). Es decir, en la actualidad los procesos productivos, incluido la minería se han automatizado, evitando así riesgos y daños a la salud de los trabajadores (Ramírez *et al.*, 2022). Los daños al personal de trabajo pueden ser fatales y son producidos por las labores en espacios reducidos, falta de iluminación, atmósferas peligrosas y eventos no intencionales de caída de material (Apaza, 2020).

Sumado a la innovación tecnológica, la minería también es susceptible a temas externos como los precios de los minerales y las posiciones políticas de los gobiernos a nivel mundial. Es así que, ante las constantes caídas de leyes de yacimientos en operación, la paralización de proyectos, el incremento de los costos y el declive de la productividad, este sector enfrenta una posición donde el desarrollo de la actividad, en las condiciones actuales requiere tomar medidas enfocadas a la optimización por medio de ideas y estrategias asertivas como implementar tecnología dirigida a la transformación digital para incrementar la productividad de las operaciones mineras (Solleiro *et al.*, (2017).

En base a lo expuesto es evidente que la minería moderna presenta un potencial tecnológico siendo la transformación digital un eje importante a ser aprovechado en donde la visión es incrementar la productividad y reducir los costos de operación; resaltan también puntos como la seguridad laboral, el ambiente y la responsabilidad social. Pero también se reconoce que la industria minera se ha visto trabada por varias brechas que han impedido la exitosa visión de la minería 4.0. Ledwaba y Mutemeri (2018) indican que las causas más importantes son: el apego a los métodos tradicionales, el desconocimiento por parte de las empresas respecto a soluciones tecnológicas, la conectividad de internet dentro de una mina subterránea para la correcta operación de la maquinaria y la masificación ya que, hasta no estar probada la tecnología las mineras no se sienten atraídas en invertir y rechazan su uso.

Es así que, al enfocarse en la minería subterránea peruana, se puede evidenciar que presenta un nivel menor de productividad con respecto a minerías subterráneas desarrolladas en otros países, como nuestro vecino Chile, y la brecha se hace más grande si la comparación se hace con la gran minería superficial. Esta situación se da principalmente debido a la poca inversión y a las diversas restricciones que existen para la implementación de nuevas tecnologías que no solo son maquinarias y equipos de última generación. Sino también de aquellas que tienen una visión a la transformación digital de sus procesos, siendo los paneles de control y *dashboard* con información en línea, los pilares para la mejora continua en la minería del futuro, cuyo objetivo es la búsqueda de la excelencia operacional e incremento de la productividad, objetivo que va de la mano en conseguir los menores costos de producción. Es por ello que la presente investigación es un medio para contribuir con información actualizada del empleo de tecnología para mejorar la actividad minera, presentando los beneficios a las empresas que extraen minerales en el Perú

Es así que adaptarse a la realidad mundial es una responsabilidad para que la minería pueda asegurar la dotación de minerales a un precio accesible con la reducción de sus costos, siendo más eficientes y productivos, con lo que se abre el campo hacia la cultura de la denominada minería inteligente. Este concepto implica utilizar tecnología avanzada e incorporarla en la minería tradicional debido a los beneficios que brinda (Hartlieb *et al.*, 2022).

En este marco también resalta la importancia del talento humano, ya que los incidentes laborales dentro del sector minero son considerables, lo que constantemente coloca en situaciones de riesgo a los trabajadores (Rodríguez *et al.*, 2019 ; Apaza, 2020). Además, la realidad del COVID 19 ha ayudado a reducir las brechas y ha acelerado el uso de la tecnología en las diferentes actividades humanas, haciendo uso de la innovación tecnológica, incluido el sector minero (Linkminers, 2020). Es así que, al llevar la operación a la siguiente escala evolutiva, se cambia de un proceso manual a uno automatizado, con lo que la maquinaria realiza el trabajo, supervisada por el operador, pero con la ventaja que se salvaguarda la vida humana (Schwab, 2020).

Al analizar el impacto de la tecnología en la MST en el Perú se devela el gran componente que es la automatización de procesos, pero que progresivamente ha sido lento en esta industria principalmente por las limitaciones en lo referente a la comunicación. Siendo esta limitante para la MST un indicador de productividad y seguridad laboral, además de optimizar su funcionamiento

y obtener un mejor control de los principales KPIs. La hipótesis que se plantea en este análisis es que la implementación de tecnología enfocada en transformación digital incrementará la productividad en la minería subterránea.

Es decir, la visión de la minería en Perú no refleja una mejora a futuro, incluyendo la transformación digital a esta variable de gran transcendencia en las operaciones unitarias, que puede generar grandes beneficios al país y liderar el mercado del cual es partícipe en gran proporción. Además, de que la minería es actividad que genera más de \$25.774 millones de dólares (10% PIB) y que requiere innovar en sus procesos para disminuir los costos de producción, lo que se traduce en mayores ganancias, un canon representativo para las municipalidades y así asegurar las inversiones en este sector.

La presente investigación propone la demostración con un caso de éxito que la implementación de tecnología enfocada en la transformación digital incrementa la productividad en una operación minera subterránea en el Perú, para lo cual se empleará una revisión literaria conociendo el estado del arte y los desafíos que presenta para poder ser adoptada en la industria minera debido principalmente a la oposición referente a los costos de implementación y el desconocimiento de los beneficios. Con ello se podrá divulgar los resultados obtenidos del caso real de estudio en una compañía minera peruana que emplea el método subterráneo, que como se mencionó anteriormente en el proceso productivo minero la tecnología no es una variable contemplada. Y así puede mejorar la *performance* de su operación, incrementando su productividad y bajando costos de producción.

Para complementar el objetivo principal de la presente investigación, en primer lugar, se diagnosticará las principales ventajas y desventajas relacionadas con la minería subterránea en la comunidad científica para conocer la situación actual de este método de explotación. Luego, se examinarán los desafíos de las tecnologías de MST para que puedan ser empleadas en el territorio peruano, identificando las que presenten potencial para ser implementadas. Finalmente se analizará el impacto de la tecnología por medio de un caso de estudio aplicando el conocimiento adquirido a la realidad de una empresa minera.

Para analizar el problema de investigación las variables no se manipularán, debido a que el estudio se centrará en ser descriptivo, a partir de la revisión literaria realizada principalmente en

revistas de alto impacto, tesis, documentos e informes gubernamentales y el análisis de un caso de estudio que permita medir el impacto de la tecnología en la MST. Por lo que se establece el alcance para la adquisición del conocimiento de la información relacionada con la tecnología y el sector minero. Es por ello que se abarcará un nivel explicativo, donde por medio de la observación del fenómeno a estudiar se buscarán las causas que originan el problema.

Es así que el estudio incluirá un diseño no experimental, siendo este tipo de estudio el que se desarrolla recopilando información vital para el propósito del mismo y analizando la problemática relacionada. En este marco se reconocerán como variables a los principales indicadores clave de desempeño de la empresa minera NEXA, ya que en términos generales el KPI más importante de la producción es la extracción que se refleja en toneladas extraídas, y para ello es necesario explorar los procesos internos como avances, perforación y costo relacionado. Por ello se han seleccionado estos KPIs y con ello recopilar la información necesaria.

A su vez el corte de la investigación será transversal, es decir la realidad evaluada representa un momento único en el tiempo, siendo este el período comprendido entre el año 2021 a 2022, en donde se implementó cierto nivel tecnológico en la empresa. Debido a que la política de la empresa se enfocó en la utilización de tecnología en el control de procesos, una visión que permitió evaluar este cambio en el caso de éxito. El universo para estudiar es el territorio peruano siendo el enfoque la industria minera subterránea, tomando como muestra de tipo no probabilístico a la empresa minera NEXA para analizar el impacto de la tecnología en su desarrollo.

Una vez recolectada toda la información se presentará en capítulos siendo el primero relacionado al estado del arte, estableciendo los aspectos generales de la MST, las tecnologías existentes y la situación actual en el Perú. Dentro del segundo capítulo se desarrollará el problema a investigar donde se abarcarán todos los aspectos de importancia como las ventajas y desventajas de la MST, la importancia que representa esta actividad, los desafíos detectados en el desarrollo tecnológico y la aplicación en un caso de estudio determinando que tecnología puede emplearse, como mejora la operación y el nivel de productividad, así como los costos relacionados. En el tercer capítulo se discutirán todos los resultados encontrados.

CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE

2.1. Aspectos generales de la minería y tipos de minería

Esta actividad se desarrolla de forma industrial y artesanal, siendo la primera la explotación más expandida en toda la escala mundial, enfocándose principalmente en la obtención de minerales metálicos, energéticos e industriales, con grandes equipos y herramientas que van de la mano con la tecnología. En cambio, la denominada artesanal, es muy rústica, ya que, emplea técnicas y procedimientos de hace ya varios años y con un poco desarrollo tecnológico, siendo en muchos casos ejecutada sin conocimiento previo y, por lo tanto, peligrosa (Kalisz *et al.*, 2022).

En el caso de la minería subterránea el peligro se relaciona particularmente por las condiciones en las que se realiza esta actividad, ya que, la geología del terreno puede presentar adversidades que se relacionan con la heterogeneidad y anisotropía de la consistencia del relleno rocoso, que de no existir estudios de su caracterización hacen que sea limitado el conocimiento del mismo. Además, la falta de espacio representa para las labores diarias un factor que limita la cantidad de luz para el desarrollo de las tareas, genera una atmósfera reducida y peligrosa, que en sinergia con lo antes mencionado, dificulta más el trabajo, por lo que existen no solo incidentes sino enfermedades en el personal, por la búsqueda de minerales (Khaboushan *et al.*, 2020).

La explotación de los recursos, en este caso minerales, se destina en primer campo a producir energía eléctrica, materiales para automoviles, materiales de construcción, acero, asfalto, componentes electrónicos, entre otros. Es así que esta actividad representa para la sociedad, como la conocemos, un medio por el cual cada persona puede acceder a una condición de confort, directamente relacionada con su estilo de vida (Amoroso & Orellana, 2019). Aunque, también dentro de las etapas en las que se realiza todo el proceso, existen varios riesgos a los que están expuestos el personal de trabajo, por lo que se considera una actividad altamente riesgosa.

En términos económicos, esta actividad representa para cada nación un ingreso considerable y de importancia, ya que, la minería aporta significativamente al flujo de dinero de un país, y más aún cuando están en vías de desarrollo. En este ámbito se incluyen en el flujo de

divisas que se obtienen debido a la exportación de *commodities* minerales, y así se genera una gran riqueza, ofertas laborales tanto directas como indirectas, siendo estas impulsadas en zonas que se caracterizan por presentar índices de pobreza.

Por lo tanto, se incluye a la productividad como un punto clave dentro de una operación minera, y se puede definir en términos generales en la industria extractiva, como la relación del producto expresado en unidades físicas (toneladas de material extraído) con respecto al insumo expresado en horas efectivas de trabajo. En la actualidad, el concepto de productividad está cada vez más vinculado con la gestión eficiente de todos los procesos, con la sostenibilidad de la operación y con la satisfacción de los grupos de interés. Para medir la productividad de los procesos en minería, se debe partir de un control de gestión integrador, lo que significa la articulación y alineación de todas las áreas de la empresa en procura del logro de los objetivos de gestión, concebidos desde los objetivos estratégicos de la empresa y expresado a través de los planes de producción. Este control de gestión integrador, debe contar con un sistema de toma de decisiones basado en información oportuna y efectiva que permita conocer la productividad actual del proceso; identificar las variables clave; determinar los parámetros operativos; y determinar los efectos en la productividad que pueda ocasionar los factores del proceso considerados críticos (Salomón *et al.*, 2018).

Es así que aunque se reconoce la importancia de satisfacer necesidades humanas por parte del sector minero, es evidente los riesgos asociados a esta práctica que ha evolucionado en el tiempo, pero aún existen varias posibilidades de que exista la ocurrencia de algún tipo de incidente o accidente dentro de las minas. Es por ello que se reconocen varios riesgos asociados por diferentes agentes dentro del ambiente laboral de la minería, entre los cuales se citan los siguientes: explosiones, gases provenientes del trabajo y acumulados debido a una mala ventilación, choques eléctricos, derrumbes de rocas, colapso de los túneles, inundaciones, caídas, mal funcionamiento de las máquinas, inadecuado estado funcional de los equipos y maquinaria, entre otros. Estos riesgos pueden ocurrir en cualquier explotación minera en diferentes partes del mundo (Chung *et al.*, 2022).

Es por ello que ante esta problemática también surgen ciertas medidas a tomar para que pueda desarrollarse con seguridad. Una de las formas de crear un ambiente seguro dentro de la

explotación es la implementación de políticas internas, así como un plan de contingencia. Es de esta manera que cada empresa minera puede tomar como referencia a los sistemas de gestión integral que se encuentran dentro de la normativa internacional ISO. Dentro de estos temas se encuentra la dotación de equipos de protección personal para el talento humano, así como constantes capacitaciones para fortalecer el conocimiento y general una cultura de riesgo. Por ende, se vigila y controla manteniendo registros tanto físicos como digitales, con lo que se garantiza la efectividad de las medidas y así encaminar el proceso a una mejora continua (Amoroso & Orellana, 2019).

Entre los principales cambios notables dentro de la minería se exhiben aquellos en los que el desarrollo de la tecnología ha ocasionado que se humanicen ciertos procesos pero, existen aún tareas que exigen que el personal ejecute una elevada carga física que, no son realizadas con base en criterios ergonómicos. Las enfermedades que pueden ocasionar desórdenes musculoesqueléticos, por lo tanto, una correcta evaluación es un paso inicial e importante para que los factores de riesgo sean identificados y se adopten enfoques dentro de la organización.

Es así que se refleja como la minería se ejecuta en varios ámbitos, tanto culturales, sociales y económicos que en gran medida, dependerán de la ubicación geográfica donde se realice la actividad minera, siendo que en el ranking mundial resaltan países como China, Estados Unidos, Rusia, Sudamérica, que contribuyen al 70% de la producción neta. Zapata (2020) menciona que, en toda Sudamérica se conoce a la minería como una de las actividades más influyentes dentro de la economía de cada país y además que es el sustento o la base para que exista fluidez, especialmente en Chile, Perú, Brasil, Colombia, entre otros.

En Colombia este tipo de actividad está relacionada directamente como un ejemplo de amenaza, que puede potencialmente destruir la región amazónica, ya que en todo el proceso existe remoción de tierra y una gran afección a la población nativa de todo el sitio. Aunque existe un gran involucramiento del estado, en donde las fuerzas armadas están a la disposición para que, no exista minería ilegal; siendo una fortaleza a destacar. Existe una gran debilidad primordial que es el daño ambiental que se genera, sea o no legal la extracción, porque no puede mitigarse con facilidad. Es por ello que en este territorio la obtención de un licenciamiento para ejecutar la práctica minera, no presenta buenos resultados porque la regularización que ejerce la autoridad responsable no es

eficaz y los problemas que deberían controlarse hacen que la imagen de la minería represente rechazo a la fase de explotación.

En el caso del Perú es conocido como uno de los países con mayor exportación de varios minerales en todo el mundo, aunque este tipo de actividad ha ocasionado también varios inconvenientes debido a que los efectos negativos de este tipo de procesos son tóxicos para los seres vivos y toda el área de influencia en donde se ejecuta. En este territorio la autoridad tanto como el MINEM y el MINAM regulan esta actividad, pero la informalidad hace que cada vez, sea más difícil el control y seguimiento de los derechos mineros. Molina (2018) indica que el aumento de la demanda de metales y minerales han llevado a una reducción de hasta 28% en la productividad de la minera peruana, siendo el principal interés incrementar la productividad por medio de reducción de costos o tecnologías de producción más efectivas.

El sector minero en Perú es una actividad que en términos de productividad representa el 11,7% del PIB, así como el 21% de las exportaciones dentro del país. En productividad laboral la minería contrató el 4,2% de empleos y las principales firmas peruanas están conformadas por Antamina, Corporación del Sur del Cobre, Yanacocha, El Brocal, Angloamerican y Milpo (Pietrobelli *et al.*, 2018). En este marco, Antamina reportó una disminución en las leyes del mineral del 1,6% a 0,8%, en un año y en todo el Perú se estima que esta productividad disminuya un 19% entre el 2012 a 2025.

La Ley N° 27651 del año 2002, presenta una diferenciación para clasificar a la minería, así como el método de explotación. En este marco se puede indicar cuatro categorías según la escala de producción y su expansión, siendo las siguientes: la primera se denomina, gran minería, que corresponde a aquella en donde su tamaño físico sobrepasa las 2.000 hectáreas (ha) y su capacidad productiva alcanza más de 5.000 toneladas métricas al día (TM/d). La segunda categoría corresponde a la mediana minería, en donde el tamaño puede sobrepasar las 2.000 ha, pero tiene un tope de 5.000 TM/d de capacidad productiva. La tercera categoría se conoce como pequeña minería, siendo esta aquella que tiene un tamaño máximo de 2.000 ha y una capacidad productiva fija de 350 TM/d. Por último, se presenta a la minería artesanal, en donde la máxima superficie que puede presentar es de 1.000 ha, con una capacidad productiva que no puede superar las 25 TM/d.

Es así que luego de conocer la clasificación de la actividad minera regulada por el estado peruano, también es de interés indicar que existen dos tipos de métodos de explotación. El primero es el denominado a cielo abierto o superficial, es un método masivo, que se realiza cerca de la superficie de la tierra, que involucra la remoción de grandes cantidades de material, también suele tener mayor probabilidad de ser un método de minería, en el ámbito legal, más rentable que la minería subterránea. En este ámbito cabe resaltar un subtipo de extracción conocida como minería aurífera aluvial, que se emplea en la obtención de oro y se considera peligrosa, en algunas regiones se ejecuta de manera ilegal, en especial en Madre de Dios, siendo aquella en donde se generan grandes áreas degradadas, ya que, la recuperación de oro hace que se produzcan grandes impactos ambientales al retirarlo de terrazas, cauces de ríos, entre otros (Zapata, 2020). En segundo lugar, como tipo de minado, se encuentra a la minería subterránea, que se basa en la práctica de recuperar todo mineral que se halle en los yacimientos en las profundidades de la superficie de la tierra. Es un método selectivo y más complejo que la minería superficial, además presenta un mayor riesgo para las personas.

Por lo antes expuesto, es importante mencionar que cada una de las categorías, tiene etapas claves, siendo estas: a) exploración, destinada a determinar las dimensiones del depósito, vías de acceso y sectores con minerales, b) explotación, etapa destinada a la incursión en el yacimiento y extracción del mineral desde el macizo rocoso c) beneficio o tratamiento, etapa donde se aplican varias técnicas para el aumento de la concentración del mineral por medios físicos o químicos (metalurgia) y d) el cierre de minas, en donde se implementan medidas enfocadas a cumplir estándares ambientales y sociales.

Es por ello que previo a la ejecución del proceso productivo está la fase inicial de las preparaciones mineras, en las cuales se incluyen a todas las actividades requeridas para que se emplace una infraestructura adecuada de una explotación. Es decir, inventariar los requerimientos para que se ejecute el proyecto y de ello también depende el método de explotación, ya sea superficial o subterráneo, siendo estas las que se analizarán a continuación.

2.1.1. Minería superficial

El Ministerio de Ambiente del Perú (MINAM) (2017) indica que esta minería es la que se realiza en la superficie terrestre o también denomina como a cielo abierto, siendo las etapas de este

proceso la explotación, perforación, voladura, acarreo, limpieza y transporte. El principal mineral que se recupera dentro del territorio es el cobre con minas en Cerro Verde, Antamina, Las Bambas, Antapaccay, entre otras.

En este marco, la extracción del mineral presenta varios conflictos socio – ambientales, ya que existe contaminación del aire (polvo), del agua, un impacto visual considerable por la actividad, así como la contaminación acústica. Siendo importante resaltar que el agua es clave para todas las operaciones mineras. Por último, para que se desarrolle el proceso es necesario que el yacimiento presente una gran área física y más aún que no esté muy alejada de la superficie.

Una de las características principales de la minería superficial y que determina su empleo en un proyecto minero, es que es masiva y depende en gran medida de la formación mineralógica del yacimiento, siendo la más adecuada para los que son de poca profundidad y se encuentran principalmente en forma horizontal o cercanas a esta orientación. Este método de minado se resume en la actividad de retirar una a una las capas de tierra hasta lograr acceder a los minerales que se encuentran en yacimientos cercanos a la superficie o a poca profundidad, suele afectar a una superficie más amplia, esto debido a que la excavación se realiza de manera más horizontal que vertical. Con estas características se resalta que la forma en cómo se lleva a cabo la minería superficial es con el uso de maquinarias como perforadoras con martillos de gran diámetro y longitud, excavadoras, palas, volquetes o camiones gigantes, entre otras. Estos son los insumos vitales para que sea posible la remoción de enormes cantidades de material.

Uno de los riesgos externos de este método es que existen infractores que inciden en ingresar a este espacio con la finalidad de obtener algo del mineral a explotar. Es por ello que dicha zona debe estar correctamente señalizada y contar con un sistema de control tanto al ingreso como a la salida, para que no existan personas ajenas. Durante la ejecución de este método el terreno debe trabajarse bajo un sistema de bancos o gradas. Esta forma de trabajo debe presentar alturas y anchos que se determinan por el ángulo del talud, comportamiento de la roca, dimensiones de los equipos, necesidades para maniobrar, considerar futuras expansiones y otros para garantizar la seguridad y evitar riesgos en los frentes de trabajo.

Estas consideraciones antes mencionadas, se relacionan con que, si los materiales no están consolidados estructuralmente, ocasionan derrumbes o deslizamientos que sepultan al personal si

se encuentra laborando, los equipos y retrasan el proyecto, lo que incurre en mayores costos operativos y daño a las personas. Es por ello que los bancos deben adecuarse, cuidando el ángulo del talud no supere al material natural en reposo y también la altura ni sobrepase a la del equipo. En los proyectos que utilicen medios hidráulicos, las precauciones están enfocadas en evitar derrumbes y deslizamientos, ya que se suele cargar los bancos ubicados en las cotas próximas sobre el mismo vertical. En cambio, en los frentes de trabajo debe permanentemente existir un control verificando que no existan fallas que ocasionen un desmoronamiento, posibles desprendimientos de rocas, las paredes estén estables y que se vele por la seguridad laboral.

En algunos casos la minería superficial también se realiza para extraer carbón por medio de la técnica de descortezamiento de filones superficiales, a diferencia de los metales en donde la profundidad obliga a cavar. En este marco también existen canteras, en donde se extrae roca con un alto grado de compactación en yacimiento localizados y que se fracturan para ser extraídas, generando agregados como la dolomita y piedra caliza que, en algunos casos son usadas para producir cemento o la denominada cal viva. Es así que, dentro de este tipo de minería, es necesario contar con la topografía que se analiza en la fase de prospección y así establecer la mejor opción de extracción porque varias minas a cielo abierto no cuentan con infraestructura como vías de acceso.

2.1.2. Minería subterránea

En minería, los principales indicadores de productividad como indica Horinson (2012) son: Costo (\$/tonelada métrica producida), Mano de obra (\$/tonelada métrica producida), Perforación (metros perforados/tonelada métrica rota), Costo perforación (\$/tonelada métrica rota), Voladura (toneladas métricas rotas/metro perforado) y Costo transporte volquetes (\$/tonelada métrica producida). Y específicamente en MST, se puede analizar también indicadores como eficiencia de desarrollo (metros avances/tonelada extraída), ventilación en interior mina (m³ de aire respirable), resistencia de sostenimiento (MPa), entre otros.

El Ministerio de Minería de Chile (2020) menciona dentro de su informe de indicadores de productividad que las minas subterráneas, perdieron 1,6% de productividad anual entre el año 2004 a 2013. Es así que su principal indicador es el laboral en donde en promedio se obtuvo 5 ktm de mineral por trabajador (ktm/trab), siendo la gran minería la que ocupa el primer lugar con más de

15 ktm/trab y la mediana minería en gran proporción esta por debajo del promedio (5 ktm/trab). Además mencionan que es de importancia recordar que existe una gran diferencia entre la MST y a cielo abierto, respecto a productividad, ya que las minas a tajo abierto incluyen la suma de mineral y lastre, y la subterránea al ser selectiva, incluye solo el mineral extraído. En términos generales dentro del Perú la productividad en minería subterránea medida en mano de obra refleja problemas de una disminución del 30% desde el 2005 hasta el 2014. Además los costos en la industria minera en general se han incrementado principalmente por el aumento de los precios de algunos insumos como el petróleo, y en algunos nuevos proyectos, el uso de agua de mar debido a que se necesita transportar hasta las minas (Pietrobelli *et al.*, 2018).

Rodríguez *et al.* (2019) mencionan que este tipo de minería opera en las condiciones en las que trabaja una fábrica, porque produce materiales dentro de la superficie terrestre y así todos los trabajadores realizan labores encaminadas a la extracción de material rocoso. En este marco es evidente que todos los tipos de proyectos que se desarrollan requieren de una gran carga física y que la operación se realiza en condiciones ambientales desfavorables para el personal debido a la condición dentro de la tierra. Es así que los principales riesgos para el personal es la falta de aire, la alta presencia de polvo, acumulación de gases y la constante probabilidad de que exista una caída de las rocas.

Dentro de las minas subterráneas las tareas a realizar consisten en el desatado de rocas, sostenimiento, perforación, voladura, aireación de los túneles y acarreo del mineral hacia la planta concentradora. En el desatado se detecta y desata la roca que esta suelta en el techo, por encima y a los costados de la labora minera, ya que, con ello se garantiza la seguridad de todos los trabajadores dentro de la mina, por lo tanto, se crea un ambiente seguro en la excavación. Es así que el procedimiento es el siguiente: 1) se identifican problemas del terreno relacionados a rocas sueltas debido a la inseguridad generada por el terreno, 2) se prepara la superficie o cara para ser desatada y se incluye un lavado de la misma, 3) se seleccionan barretillas, si es de manera manual, o se utiliza equipos mecánicos (*scaler* o desatador), 4) se desata en función a las condiciones y procedimiento establecidos por la empresa.

En el caso del sostenimiento, se realiza colocando un soporte estructural para que el equilibrio que se ha perdido dentro de la superficie de la mina se recupere. En la mayoría de los

tipos de minería subterránea, el proceso de sostenimiento es una actividad con un alto costo y gran esfuerzo en mano de obra pero a la vez es una actividad esencial para proteger a las personas y a los equipos de potenciales accidentes. El tipo de sostenimiento que se utilice depende de las características de la roca de la labor minera.

La tarea de perforación es la actividad previa a la voladura, en donde se abre taladros dentro de la roca, para colocar explosivos, así como varios accesorios como los iniciadores. La acción mecánica de rotación y percusión, basadas en el golpe por fricción produce la trituración y el astillamiento de la roca. Ahora existe diversos tipos de perforadoras como las manuales utilizadas en la minería convencional (*jacklegs*) y las perforadoras mecánicas con equipos como los jumbos, utilizados para perforaciones horizontales, y los *simbas*, utilizados para perforaciones verticales o en forma de abanico.

La siguiente actividad es la voladura, que está establecida como la rotura que se produce en la roca, ya que se alteran los componentes de la misma, así como los parámetros geomecánicas y así reducir la capacidad de resistencia frente a la fuerza ejercida. Los trabajadores realizan el siguiente procedimiento: 1) movilizan el explosivo incluido los accesorios a un sitio seguro, 2) cargan los taladros con material explosivo (dinamita o emulsión) y se confina la columna donde se colocaron, 3) luego de cargar los taladros se ubican varios tacos con material inerte en cada taladro, 4) se arranca la voladura bajo la supervisión del encargado y a en cumplimiento al programa de trabajo.

Al finalizar la voladura, y luego de realizarse la ventilación necesaria, se procede con la tarea de acarreo de mineral, en términos generales se recogen los materiales utilizando una pala neumática, LHD (cargadores de bajo perfil), entre otros, esto llenan los equipos que llevaran el mineral hacia la planta de beneficio, el transporte de mineral puede realizarse por volquetes, *dumper*, fajas transportadoras o ferrocarril.

En este método de explotación existe el objetivo de controlar el terreno, por lo que para que se desarrolle la explotación con seguridad se requiere, al igual que en otros proyectos como hidroeléctricas o túneles, se apliquen criterios técnicos de mecánica de rocas. Este término se refiere a la ciencia que estudia el comportamiento mecánico tanto de las rocas como estratos rocosos, siendo estos complejos. Entre las herramientas que pueden emplearse está la investigación

del terreno, medidas para minimizar el daño de la voladura, supervisión y soporte del terreno. Es así que muchas minas subterráneas disponen de departamentos dedicados a la geomecánica de esta problemática debido a que representan una mayor dificultad que las superficiales y, por lo tanto, requiere de una mayor cantidad de inversión.

Cabe mencionar que dentro de la minería subterránea existen diversos subtipos de métodos que dependen directamente del tipo de yacimiento, ubicación, inclinación, tipo de roca, entre otras características. Entre ellos tenemos los siguientes subtipos: corte y relleno, cámara y pilares, *block caving*, *sublevel stopping*, *shrinkage*, etc.

2.2. Principales ventajas y desventajas de la minería subterránea

En este método de explotación como indican De la Cruz et al. (2013) existen varias vicisitudes, así como potencialidades que convierten a la minería subterránea en una oportunidad para que en función a un manejo adecuado y la implementación correcta de herramientas tanto físicas como digitales, sea altamente productiva y disminuya los problemas relacionados a esta variable. En general, la MST resulta ser compleja si se compara con la superficial, siendo la principal dificultad la existencia de diversas formas geológicas que pueden ser irregulares, inclinadas, estrechas o con presencia de una gran cantidad de gases (explosivos o tóxicos), todos estos factores incrementan la peligrosidad en la explotación (Horinson, 2012).

En otros casos, la complicación puede darse por la presencia de agua que, al encontrarse en los yacimientos, debilitan las paredes al momento de la excavación para la extracción y están sujetas a grandes presiones del macizo rocoso. En cambio, la MST genera en menor cantidad escombros e impactos ambientales negativos, ya que, al formar túneles, solo se remueve cierta cantidad de roca y no en grandes superficies como en la de cielo abierto. Adicionalmente los gases de algunos yacimientos pueden ser explosivos por lo que para ello la ventilación es cuidada con rigurosidad para la protección del personal como la maquinaria para que sus propios motores no generen el contacto para una explosión (Apaza, 2020).

Las maquinarias y tecnologías que se introducen en la MST, son una limitante ya que, pese a los altos rendimientos resulta ser una desventaja en términos de aceptación y costos, que en las minas a cielo abierto. Es así que en yacimientos con formas irregulares no son considerados como

productivos debido a la experiencia de los trabajadores y más aún la especialización de los mismos. Para el ingreso a las minas, existen varios tipos como las galerías horizontales o planos inclinados (boca mina) o por pozos verticales (pique), que funcionan con un principio de ascensores. Es así que una desventaja notable para este método de explotación es la profundidad a la cual se realizan las actividades, sin embargo, su selectividad de minerales es un aspecto positivo para este tipo de método. De manera similar a la minería superficial, existen cantidades de escombros que deben retirarse y esto hace que el transporte al exterior necesite de varios equipos para la ejecución de la actividad.

Con base en lo mencionado, se establece un panorama claro entre los conflictos que puede presentar una explotación subterránea de la misma forma como los aspectos positivos resaltan frente a su principal competencia la minería superficial. Es por ello que en términos generales las ventajas de la MST es que, existe una disminución considerable de la contaminación en la zona y las áreas de influencia cercanas a la misma, porque el o los minerales que se extraen proviene de las profundidades subterráneas y así no existe un efecto en la afuera de la mina y por lo tanto al medio ambiente; en especial el desorden tanto en el suelo por la remoción como visualmente por la acumulación de escombros como cobertura removida.

Otra de las ventajas principales es que no requiere retirar las grandes superficies de suelo como en la superficial, tampoco el empleo de explosivos en la superficie. La MST realiza su operación por medio de la excavación creando labores mineras horizontales y verticales, que antes de ejecutarse son debidamente planificados siendo la estrategia llegar desde la superficie hacia la parte interna de la tierra directo al mineral o el área repleta del mismo. Es por ello que, también se considera a este método como directo, debido que no existe exposición al ambiente de los desechos generados por la explotación.

En términos ambientales la ventaja más importante a resaltar es que con la MST, el impacto es menor con respecto a la minería superficial al patrimonio natural como los bosques, además de espacios con recuperación muy extendida siendo las plantaciones agrícolas, las fuentes hídricas y en los casos más extremos las zonas urbanas. Finalmente, la característica que sobresale dentro de las ventajas ya mencionadas es el ciclo de vida de una mina subterránea, ya que este método nos

arroja una mayor probabilidad de una vida más larga en lo que concierne a la explotación y a largo plazo una empresa minera puede incrementar su productividad.

Al contrario, las desventajas de este método de explotación se relacionan en primer lugar con la mayor cantidad de capital necesario para la ejecución de proyectos de esta índole. En los apartados anteriores ya se mencionó que una limitante es la inversión que se requiere, y que se utiliza principalmente en la preparación del terreno para ser perforado, la seguridad del personal y la ventilación a emplear; todos estos parámetros deben ser probados y efectivos.

Relacionado a la seguridad laboral, en este método de explotación existe un nivel de riesgo considerable para los trabajadores, así como personal de apoyo que trabajan en toda la operación de la mina. Entre los riesgos a los cuales pueden estar expuestos están los derrumbes, gases y cualquier sustancia proveniente de la mina, que pueden ocasionar efectos nocivos en el ser humano.

Además del inminente riesgo a las explosiones, incendios, inundaciones o los sobre esfuerzos físicos. Otro punto importante a destacar es que una desventaja presente en toda mina, es el espacio reducido para trabajar, y los equipos y maquinas limitadas para esta labor. Esta característica también desencadena unos tiempos de espera prolongados porque es necesario que el funcionamiento este 100% en marcha por cuestiones de seguridad al momento de perforar por lo que el ambiente en la labor minera debe ser seguro para que los trabajadores. En último, pero no menos importante, se indica que económicamente las empresas mineras consideran los costos de mano de obra como altos, debido a que el trabajo en MST tiene su riesgo e influye en varios aspectos de dependencia laboral, como seguros por accidentes y, por lo tanto, la productividad es baja considerando los costos totales de la operación.

2.3. Cadena de valor en la minería subterránea

La cadena de valor dentro de la minería subterránea es un modelo que describe todas las actividades que realiza una organización y generando valor al cliente final. Una de las ventajas de esta herramienta de gestión es la realización de un análisis interno para que cada actividad se realice con eficiencia. Es así que se incluye desde la extracción de los minerales hasta la entrega

al cliente final, siendo de importancia para evitar la generación de cuellos de botella y así disminuya la productividad (McKinsey, 2020).

Es por ello que se puede diferenciar como producción primaria a la prospección, exploración, explotación de la mina, beneficio, y comercialización de la materia prima en el mercado. La exploración es la primera etapa de todo el proceso de minería que se realiza al concederse el contrato de concesión, siendo su principal objetivo encontrar la zona en donde se concentra el mineral, siendo esta el yacimiento. Entre las actividades están incluidos los trabajos, obras o estudios que sean necesarios para establecer la existencia y ubicación del material, la geometría del depósito, cantidad y calidad a explotar y la viabilidad técnica de ser extraído con el menor impacto ambiental posible.

En cambio, la explotación se refiere al método a emplearse, existiendo la minería superficial y la subterránea. En el caso de la subterránea se desarrolla la explotación dentro de la tierra por medio de túneles verticales, así como horizontales. Por lo que se labora desde una chimenea de acceso y se establecen niveles a diferentes alturas. Es así que la explotación se refiere a todas las operaciones mineras con las cuales se prepara y explota el yacimiento, incluyendo la extracción y transporte de los minerales. Y entre las actividades más importantes a realizarse están la instalación de equipos, sostenimiento, perforación y voladura, carguío y acarreo.

El beneficio concierne al tratamiento que se da al mineral explotado con lo que puede elevarse el contenido útil o ley de este. Es así que puede considerarse como el refinamiento del material, ya que con base en el proceso se separa la mena y la ganga. Entre las actividades de este conjunto de procesos están: a) trituración, con la finalidad de disminuir el tamaño de la roca, b) molienda para reducir el tamaño de partículas grandes provenientes de la trituración, c) homogenización, para compensar la variación granulométrica de la molienda, d) clasificación, para separar la mezcla de las fracciones con base en el tamaño y e) concentración, fase final de separación del mineral de la roca (Vassallo, 2008). Por último, se encuentra la comercialización que hace referencia a toda la compraventa del mineral o inclusive la negociación de los contratos para que el producto pueda ser adquirido por el cliente final.

2.4. Productividad en la industria

En términos generales la productividad esta marcada como la relación existente de la cantidad de producto que se obtiene por una empresa y los recursos empleados para el mismo, como materia prima, talento humano y tiempo. Es por ello que la importancia de esta variable está determinada por la capacidad competitiva de la organización, ya que se considera que carecen de competitividad al presentar una baja productividad (Jiao et al., (2018).

Con base en lo antes expuesto la productividad es clave para que el crecimiento económico se refleje a lo largo del tiempo, ya que, la eficiencia de los recursos se mide por medio de este indicador. Es decir, la existencia de la productividad está ligado directamente con una mayor producción y con la reducción de la utilización de recursos en gran proporción (Céspedes, 2016). Es así que la productividad impacta directamente en toda industria al enfatizar en la toma de decisiones aquellas que aumenten la producción, esto se denota en la cantidad y calidad de los insumos, tecnología empleada y los procesos aplicados dentro de la operación. Sin embargo, factores como la innovación son claves, ya que, pese a que exista eficiencia en un proceso productivo, sin la exploración de herramientas que aumenten la productividad, la empresa no será más eficiente y eficaz, y puede estancarse (Canales & García, 2018).

Una manera de establecer o medir la productividad dentro de una minera es el uso de indicadores clave de desempeño (KPI, por sus siglas en inglés, *Key Performance Indicators*). Es así que estas métricas son de relevancia para evaluar el proceso productivo y determinar si existe éxito en la explotación. Estos indicadores pueden estar representados por una unidad de medida o en porcentaje, en el caso de la minería subterránea es posible encontrar KPIs de Extracción de mineral, medido en toneladas, Avance de mina, medidos en metros y Perforación de Taladros largos, medido en metros.

En el caso de la Extracción de mineral (ton), permite recolectar información acerca del trabajo realizado por día, llevarlo a semana y así mantener un monitoreo mensual del material extraído, siendo de importancia para la planificación de la mina, así como cuantificar la cantidad que se ha explotado (minerales obtenidos) y regular casos en los cuales se reduzca la eficiencia del trabajo.

El Avance de mina (m) es un indicador de la explotación el cual es medido por la acción de los jumbos de perforación, maquinaria diseñada para el avance de los túneles en minería subterránea principalmente. La importancia de este KPI es que nos ayuda a medir la preparación de la infraestructura necesaria para el minado de los bloques de mineral.

Los Perforación de Taladros largos (m) se consideran dentro de este ciclo minero como la ejecución de orificios circulares llamados taladros, los cuales pueden ser de diferente diámetro dependiendo del diseño de mallas de perforación, máquina a utilizar, tipo de rocas entre otras variables. Estos taladros pueden realizarse de manera positiva, negativa o en forma de abanico en el macizo rocoso. Luego de ser ejecutados, estos son llenados con explosivos que junto a diferentes accesorios de voladura llevan a cabo el proceso de fragmentación de la roca.

2.5. Tecnologías empleadas dentro de la minería subterránea

La industria minera ha tardado varios siglos en desarrollarse, a ese paso se introdujo la llamada industria 4.0, esta cuarta revolución industrial inicio desde el 2011 en el territorio Alemán. Entre sus principales objetivos busca una mayor rentabilidad operativa, fertilidad y niveles de automatización. Es así que esta industria avanzada busca dar un valor agregado y la gestión del conocimiento por medio de: 1) transferencia y comunicación automática de información, 2) interacción máquina – humano, 3) automatización y conformidad, 4) industrias y ejércitos de valor agregado, y 5) optimización, personalización de la producción y digitalización (Poormirzaee *et al.*, 2022). Por lo tanto, esta nueva revolución busca el nexo entre elementos físicos como dispositivos, sensores y activos con la red de internet, para que el proceso productivo sea automático, ininterrumpido y optimizado siendo el resultado el incremento de la productividad.

La ingeniería minera inteligente es una tarea de multiples criterios, donde la estrategia para implementar tecnología es un tema de debate para los gerentes de la industria. Es por ello que una decisión acertada se centra en las etapas de operación como perforación, voladura, carguío y transporte, trituración, molienda y procesamiento. El resultado será la incorporación de sistemas basados en industria 4.0 en varias partes de las operaciones mineras si las condicioenes son favorables (Poormirzaee *et al.*, 2022). Varias empresas mineras de todo el mundo buscan reducir costos y aumentar su productividad, en cierta medida el sector minero ha empleado algunas tecnologías de la industria 4.0 dentro de sus operaciones. Sin embargo al comparar con otros

sectores se ha evidenciado que la minería ha pospuesto el empleo de nuevas tecnologías y varias actividades se realizan por el método tradicional (Sishi & Telukdarie, 2020).

La tecnología está intrínsecamente relacionada con la innovación, siendo este un proceso que surge dentro de las organizaciones. Por lo que los pasos para conseguirlo son la introducción de la tecnología, el método para llevarlo a cabo, y el establecimiento dentro de la empresa. En este marco la constante demanda dentro del sector minero es uno de los impulsores para que los procesos resulten ser más efectivos e incrementen la productividad innovando tecnológicamente sus procesos (Brescia *et al.*, 2020). En el caso de Perú, Alania (2017) presenta a la innovación como un nexo para dar soluciones a problemas operacionales, ya que la Compañía Minera Antamina desarrolló un programa denominado Desafío de Alto Valor (DAV), en donde interactúan todos los proveedores brindando soluciones que pueden ser implementadas y que deben ser innovadoras y transfieran tecnología replicable.

En el año 2020 el Instituto de Ingenieros de Minas del Perú (IIMP) indicó que la cotización de los principales minerales exportados alcanzó valores positivos en el mercado internacional, ya que al cerrar el año los precios de los metales se incrementaron con en el caso del hierro (+63,5%), plata (+45,2%), cobre (27,6%), oro (+25,4%), zinc (+22,4%) y plomo (+6, 3%) (IIMP, 2020). Al estar ampliamente difundida en todo el territorio peruano, se reconoce que la minería es una de las actividades más importantes en el país (MINEM, 2021). Es por ello que, aportar con información actualizada acerca de la realidad mundial respecto a las tecnologías relacionadas a la MST, es de gran importancia para que el gobierno dé las facilidades para promover la inversión privada y las empresas puedan efectuar procesos automatizados y que generen el menor impacto ambiental posible.

Es así que los principales nexos entre la tecnología y la minería son los proveedores ya que, estos llevan a cabo importantes actividades innovadoras, siendo muchos de ellos los que desarrollan nuevos productos, exportan equipos y maquinaria, así como bienes, servicios y tecnología. Pero una variable que influye en gran medida es que las grandes empresas mineras no contribuyen vínculos para la innovación sino prefieren soluciones por parte del proveedor principal, pero dejando de lado a las capacidades científicas, tecnológicas y relacionada a la producción de otros proveedores (Pietrobelli *et al.*, 2018). Este antecedente denota que la

divulgación de casos de éxito puede romper esta barrera para que inicien procesos de negociación con líderes tecnológicos y la industria minera, siendo la productividad la principal estrategia a abordar y Perú, no es la excepción ya que las empresas mineras se guían por la reputación y experiencia para adoptar las soluciones tecnológicas de un proveedor (Molina, 2018).

Curiosamente, la demanda del sector minero crea incentivos para la innovación no solo por los mayores beneficios esperados al asociar I+D (Investigación y Desarrollo), sino también porque se agotan los recursos y yacimientos de buena calidad. Es así que la productividad se ve afectada a menos que se opten por insumos particulares y soluciones a medida que involucren minería de datos, como lo aplica EE.UU., Australia y Canadá, donde el nivel de tecnología innovadora es debido al proveedor de minería intensivos en conocimiento (KIMS). Es así que algunos ejemplos son los sistemas asistidos por computadora, nuevas formas de comunicación en la mina, detección remota de depósitos a través de imágenes satelitales, entre otras.

Ernst y Young (2018) indican que uno de los riesgos empresariales es la eficacia digital, ya que la desconexión de la transformación digital es un factor crítico para abordar los retos de la productividad y las organizaciones deben superar esta desconexión. Entre las principales tecnologías en auge hacia la iluminación digital de las empresas mineras, están la inteligencia artificial, la automatización, la analítica de datos y los riesgos de la ciberseguridad. Pero el mercado no presenta una madurez para abarcar estas herramientas sino solo la inclusión en pequeños aspectos dentro de la cadena de valor.

Es así que dentro de la minería solo se incluyen soluciones basadas en la tecnología dentro de partes específicas del proceso productivo pero no con un enfoque holístico. Este tipo de acciones no llevan al siguiente nivel porque la productividad no mejora sino se toman decisiones desde el inicio hasta el final de la operación. Además que esta presenta problemas relacionados con los costos de las instalaciones, la superposición de la tecnología sobre un estrato preexistente y la falta de capacidad para reconocer una tecnología antigua de una nueva.

Robles y Foladori (2019) indicaron dentro de su estudio que, en todo tipo de minería una de las características más notables del anterior siglo y con el presente, es que existe un gran cambio denominado megaminería y que está acompañado de varios métodos automatizados. Es así que varios de estos, se han incluido dentro de las diferentes etapas del proceso de la minería. En la

exploración se emplea el “Vulcan”, que es una plataforma para equipos geotécnicos, en la extracción, se incluyen sistemas de control como el *Rig Control Systems* (RCS) para las perforadoras. En el caso de la operación en mina, se han empleado equipos Mobilaris, que es un sistema que indica información 3D en tiempo real de todos los procesos subterráneos. En el caso de la trituración, existen sistemas automáticos ASRI para que se revisen tanto la carga como el tamaño del material ingresado. Es por ello que inclusive en la producción se han automatizado los equipos LHD, los martillos reductores, los trenes y las correas transportadoras. Por lo tanto, dentro del sector minero es posible automatizar hasta un 17% de las operaciones unitarias.

En este marco se puede contar con varias herramientas que son consideradas como la frontera tecnológica alcanzada hasta el momento, con base en la revisión bibliográfica se han encontrado varios equipos que son empleados por las empresas mineras. Es así que los proveedores surten de esta maquinaria para que se realice principalmente en el proceso productivo de la extracción (subterránea), siendo los siguientes (CESCO, 2018):

- Perforadora: este equipo es solicitado al proveedor para que presente una configuración de montaje sobre oruga, es así que puede movilizarse a través de camiones internacionales y está regulada en función al tipo de roca a la que esta máquina trabajara. El máximo nivel tecnológico identificado es la automatización.
- LHD (*Load Haul Dump* o Cargador de bajo perfil): el funcionamiento de este equipo esta direccionado desde una sala de control que esta acondicionada por un tablero de control y todos los procesos están automatizados. El máximo nivel tecnológico identificado es la automatización.
- *Jumbo* (perforador horizontal): este equipo puede estar automatizado para que el control de varias de las funciones sustituya a la experiencia humana. Es así que diversas órdenes dadas por la palanca de mando o interruptores, se asigna directamente con base en la información de los sensores y software computarizado. Una de las ventajas más notables de esta maquinaria es que la automatización no se desvía de lo ya aprendido, es decir, las órdenes programadas. El máximo nivel tecnológico identificado es la teleoperación.
- Desatador (*Scaler*): el funcionamiento de este equipo está regido por un sistema de control que es opcional, pero puede adicionar varias funciones ya programadas a las labores diarias. Estas funciones son fáciles de emplear y son utilizadas principalmente para

incrementar la seguridad laboral en el ambiente de trabajo, la precisión al momento de la operación y la producción. El máximo nivel tecnológico identificado es la teleoperación.

- *Dumper*: este es un vehículo con autopropulsión sobre grandes ruedas que son empleadas para su movilización, cuenta con una caja abierta que es muy resistente. Es empleado principalmente en el transporte de volúmenes grandes que son acarreados y contiene tierra o roca. El máximo nivel tecnológico identificado es la teleoperación.
- Ferrocarril: esta maquinaria cuenta con una locomotora que funciona con un sistema de protección contra los deslizamientos, ya que una de sus funciones es una alta eficiencia para prevenir estas acciones. La tecnología que emplea cuenta con tracción de CA de última generación, por lo que garantiza un mantenimiento que se reduce, así como los costos de inactividad. Esta locomotora está dividida en cuatro secciones, que se separan fácilmente y así contribuir a un cómodo transporte y montaje bajo tierra. El máximo nivel tecnológico identificado es la semi autonomía.

Con base en la revisión realizada referente al nivel de tecnología utilizado en la minería subterránea, es evidente que existe una transformación en este ámbito. Es así que varias actividades están encaminadas hacia la automatización, porque varios, si bien requerían de talento humano, se han reemplazado por equipos con altas eficiencias. Además, las funciones a ejecutar están enriquecidas con sistemas digitales basados en algoritmos que se programan y se adaptan a las condiciones de trabajo, por lo que representan una herramienta en la toma de decisiones. Por lo que se evidencia que la era digital influye también en la utilización de herramientas digitales, como los tableros de control o *dashboard* en donde todo el proceso minero se observa en computadora y en tiempo real.

Finalmente, surge con gran presencia la teleoperación dentro de varias tareas ejecutadas dentro este método minero, lo que se explica, ya que, el avance tecnológico ha alcanzado un nivel en donde requiere ser vigilado por el operador, pero no la presencia física del mismo. Esto indica que la automatización ha llegado en la maquinaria y ya no se requiere presencia humana, además la presencia de la transformación digital es cada vez más evidente. En el caso de la última se establece que la oleada de este enfoque presenta cuatro componentes: el pre - inicio, la primera, segunda y tercera ola.

En el pre inicio digital se encuentra el establecimiento de una visión clara para combinar la productividad con lo digital. En este marco se requiere de una inversión inicial en lo concerniente en infraestructura y disponibilidad de datos para que puedan ser empleados eficazmente por la organización. Esto significa que los procesos estarán conectados y supervisados, pero solo los estrictamente necesarios, que se denominan objetivos cuantificables (KPI) y así lograr medirlos a través de un programa las variables cuantificables.

En el caso de la primera ola, involucra las actividades destinadas a la automatización, que por lo general no requieren un cambio en la forma de operación, sino que se vincularán a la agenda productiva. Es así que en un período de 18 meses puede aplicarse, pero deben considerarse aspectos que pueden estancar este proceso como la falta de recursos, la capacidad de acción o una mala integración dentro del modelo operativo de la empresa. La segunda oleada en cambio, implica cambios significativos como, por ejemplo, la planificación minera en tiempo real vinculada al estado de los equipos y precio de materias primas. Es por ello que aún se describen algunas tecnologías necesarias que varían en función de la forma de trabajar. Por último, la tercera oleada, son los factores disruptivos, es decir, aquellos que pueden crear cambios que incluyan una diferente estrategia empresarial para ser competitivos, pero esta ola está condicionada porque la evolución de una disruptiva no puede predecirse fácilmente.

2.6. Tecnología y el impacto en la productividad

El Centro de Estudios del Cobre y la Minería – CESCO (2018) menciona que la brecha entre la tecnología con la extracción de minerales es histórica, debido principalmente a que este sector es conservador con la incorporación de soluciones tecnológicas a los métodos de extracción. A nivel internacional se estima que existe un gran potencial benéfico al implementar estas acciones en la industria minera debido a que para los años 2016 y 2025 se consideran réditos económicos de \$189 billones de dólares globales y \$130 billones por la extracción de metales, con la incorporación de menores emisiones de CO₂ o el incremento de seguridad para los empleados (CESCO, 2020).

La fusión de la actividad minera y la tecnología es un problema presente en todos los países del mundo, ya que, varios de ellos extraen minerales acordes al proceso tradicional. En este marco Perú es uno de los países mineros reconocido a nivel internacional como uno de los principales

productores, país donde existe diversos tipos de minería (gran, mediana, pequeña y artesanal) que son reconocidos legalmente. A pesar de ello también se tiene, lamentablemente, una minería ilegal. Es así que la industria minera como indica el Ministerio de Energía y Minas (MINEM), contribuye con el 60% de las exportaciones nacionales y atrae el 23% de inversión extranjera. Además, la distribución de proyectos de inversión minera está altamente disgregada en todas las provincias y departamentos del territorio peruano, abarcando más de 13,1 millones de hectáreas (MINEM, 2021).

Deloitte Access Economics (2017) indica dentro de su informe acerca de la minería y las actividades de apoyo de los equipos, la tecnología y los servicios mineros (METS, por sus siglas en inglés) que las empresas australianas, así como METS presentan mejoras tecnológicas con un rol importante que garantizan la operación productiva y aseguran la competitividad en mercados internacionales. Es así que los beneficios notados por la innovación abarcan desde mejoras en estrategias operativas hasta en las tareas individuales de cada trabajador.

Además en Australia más de 10 empresas mineras y de METS han encontrado varios beneficios en innovar con fines productivos, donde resaltan los siguientes: reducción de costes de explotación debido al aumento de la eficiencia por el uso de nuevas tecnologías, prolongación de la vida productiva de las minas al alcanzar yacimientos más profundos, mayor rendimiento relacionado al incremento en la recuperación de minerales, mejoras en la seguridad al simplificar procesos y detectar tempranamente los riesgos, existencia de mayor satisfacción y productividad del trabajador al aplicar mejoras operativas, implementar conocimientos de las instituciones e investigaciones para la mejora continua, y el desarrollo de marca y generación de nuevas oportunidades.

Es así que los beneficios abarcan al apoyo de exploración, dotación de equipo profesional, científico, informático y electrónico, en los cuales los servicios de internet y portales virtuales han innovado en gran medida el trabajo remoto y la productividad en tiempo real con lo que una empresa puede procesar datos y tomar decisiones. Por lo tanto, la tecnología dentro de la minería proporciona bienes y servicios que basados en la innovación pueden tecnológicamente llevar a una empresa a un nivel avanzado por el empleo de estos insumos, impactando en el mercado e incrementado su productividad.

2.7. La tecnología como elemento para incrementar la productividad

La productividad es una medida en la cual se puede cuantificar cualquier valor producido, ya sea por los trabajadores, el capital, productos, entre otros, durante un período establecido. Es por ello que siempre la productividad se enfoca en la eficiencia de los materiales empleados para obtener el mejor rendimiento, siempre y cuando se empleen los menores recursos posibles. De esta manera una productividad será mayor cuando se optimicen los recursos disponibles como indica la ecuación 1.

$$Productividad = \frac{\text{Productos o servicios producido}}{\text{Recurso utilizado}} \quad [1]$$

Con base en lo expuesto una de las formas de medir la productividad es con indicadores, que relacionan la producción obtenida de algún producto con la cantidad de materia prima empleada. Es así que se obtienen valores para establecer si un proceso es eficiente o si está en una fase donde no existe un ahorro tanto de tiempo como de dinero. Siendo estos los que mayor análisis representan para una empresa tanto en maquinaria, talento humano y recursos extras. La finalidad de un proceso productivo es obtener la mayor producción total de un bien o servicio.

La tecnología a su vez es una respuesta que el ser humano ha obtenido para transformar su medio y mejorar la calidad de vida o producción. En este marco se aplican tanto conocimientos como técnicas para que de una manera organizada se pueda satisfacer una necesidad. Esto en términos productivos se relaciona con el capital, tierra y trabajo. Es por ello que la tecnología se emplea para solventar problemas y aumentar la eficiencia.

Entre más avance la tecnología es posible encontrar mejoras en el desarrollo de una producción más limpia dentro de una empresa o inclusive optimizar los tiempos de producción. Sin embargo, cuando es mal empleada puede ocasionar daños debido a una falta de control. La implementación de tecnología incrementa la productividad, mejora la comunicación, reduce costes, brinda acceso a información, presenta nuevos modelos de negocio y avanza en la ciencia para que equipos o herramientas tecnológicas puedan ser descubiertas y replicadas.

Por ello tanto la productividad como la tecnología están directamente relacionadas, siendo que en sinergia pueden aplicarse con conocimiento a un área o proceso productivo y con ello solventar problemas, teniendo como objetivo principal mejorar la eficiencia.



CAPÍTULO III

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

3.1. Situación actual de la minería subterránea en el Perú

En lo que concierne a valoración minera en la actualidad, el estudio realizado por el Ministerio de Energía y Minas (MINEM) (2021), resalta la cartera de proyectos de exploración minera existentes. En este marco, la situación actual está relacionada con la reciente pandemia, ya que, para el año 2020, se cerraron los balances económicos, indicando que se ejecutaron más de \$4.000 millones de dólares de inversión. Es así que el panorama para la minería en Perú presenta una rápida recuperación influenciada por el Decreto Supremo N° 080-2020-PCM el 03 de mayo de 2020, en donde presentan el plan de reactivación.

Es por ello que, la actividad minera está considerada como el aporte de más del 12% del producto interno bruto (PIB) del país, por lo que influye en que exista un 60% de todas las exportaciones realizadas hacia otros países a nivel mundial. Es así que el país, se ubica dentro de uno de los comercializadores más importantes y considerado dentro del ranking mundial de productores mineros, pero a su vez, debería ser un estado en donde la regularización ambiental debe ser fuerte y apoyada de una ley que garantice la mitigación de los efectos de la explotación minera (Zapata, 2020). Este tipo de políticas en muchos casos existe, pero no presenta un monitoreo y seguimiento, incluido los medios de cumplimiento, en ocasiones, no se verifican en los sitios. Además, que, debido a la caracterización geológica, en todo el territorio peruano se pueden encontrar con facilidad una gran cantidad de metales.

Es así que el MINEM (2020) indica dentro del Anuario Minero que, los registros del catastro minero han presentado una gran solicitud de petitorios (5486) para que se concedan concesiones mineras. En este marco, luego de la pandemia del COVID-19 se resalta la existencia de 45.779 derechos mineros vigentes, con extensiones de más de 18.9 millones de hectáreas, representando al 14,7% del territorio nacional. Por lo tanto, en función al espacio a ser explotado se mencionan las categorías antes descritas de a) gran y b) mediana minería, c) pequeña minería y d) minería artesanal. En el caso de la primera, esta abarca varias operaciones como el cateo, prospección, exploración, desarrollo, extracción, beneficio y embarque; esta es la más tecnificada

y se realiza por el método superficial. Por su parte, la segunda, es en donde está el interés del presente estudio, ya que se caracteriza porque en su mayoría están representadas por unidades subterráneas; se limita a la extracción y concentración de minerales.

Con lo antes expuesto, es evidente que tanto las categorías mineras como los derechos están directamente relacionados porque si aumenta la primera, lo hace también la segunda. La realidad del Perú es que los derechos mineros titulados ascienden a 32.044 (10,23% del territorio), mientras que los que están en trámite son 13.735 (4,47% del territorio). Es así que la mayor cantidad de estos se sitúan en la explotación (671) y exploración (322). En la siguiente tabla se representan el porcentaje de inversión por región.

Tabla 1.

Porcentaje de inversión de proyectos de exploración de minerales (2020)

Región	Proyecto	Porcentaje de inversión	Mineral
La libertad	Llaguen	6,3	Cu
	Chorobal	6,2	Cu, Zn
	Alto	0,6	Au
	La Bandera	0,6	Au
Ayacucho	QORI	6,6	Polimetálicos
	Sombrero	5,0	Cu, Au
	Yanacochita II	3,7	Au, Pb
	Los Tambos	1,4	Au
Arequipa	Parcoy	3,8	Cu
	Iluminadora	2,2	Polimetálicos
	Cerro de Fierro	2,0	Cu
Ancash	Coloso	26,2	Cu, Au, Ag
	Los perdidos	2,9	Au, Pb
Cusco	Humamantata	1,1	Polimetálicos
Huancavelica	Pukaqaqa sur	10,3	Cu
Huánuco	Huiñac punta	3,7	Ag, Au
Junín	Oroya este	1,4	Au, Cu
Lima	Santander	4,2	Polimetálicos
Moquegua	Apache	7,8	Cu, Ag
Tacna	Curibaya	4,0	Polimetálicos

Fuente: MINEM (2020)

Es así que en el año 2021 la cartera de proyectos para ser explorados asciende a 60 (\$506 millones de dólares), estando 43 de los mismos en búsqueda de nuevos depósitos de minerales

(*greenfield*), así como 17 desean ampliar sus reservas existentes (*brownfield*). Además, se puede indicar que la mayor parte de estos, se ubican dentro de la etapa de ejecución o por ejecutar la exploración, seguido por en evaluación de la autorización y en evaluación de la declaración de impacto ambiental (DIA). En la siguiente figura se puede observar la distribución espacial de los proyectos.

Figura 1.

Cartera de proyectos de exploración minera



Fuente: MINEM (2021).

Por lo antes expuesto, se reconoce que el catastro minero presenta una gran cantidad de proyectos que se están ejecutando, obtuvieron la autorización en el año 2020 y que iniciaron su proceso durante el 2021. Esto destaca que todo el territorio peruano nunca descansa y que es un indicador para que exista un mayor control y automatización, así como se evidencia que, dentro de todos estos proyectos, se ubica a la minería subterránea como una pieza fundamental en la actividad minera. En este marco se reconoce que esta actividad no es tan grande al comparar con la gran minería y que también no se excava hasta límites profundos de la corteza terrestre, ya que, este tipo de características se encuentran más en minas de Chile o Sudáfrica.

La Revista Energiminas (2019), indica que se explotan más de 120 minas subterráneas, siendo que desde esa fecha han incrementado los petitorios, pero también es un valor que, al compararse con las superficiales (tajo abierto), no superan esa cantidad, debido a la magnitud de dichos proyectos. En el Perú las minas que presentan una profundidad considerable o son las más profundas están ubicadas en Yauliyacu, Quenuales, Poderosa, entre otras, siendo su característica principal que se encuentran a más de 1.000 metros en el interior de la superficie terrestre.

Es así que la existencia de minas subterráneas, es aún mayor a lo indicado, pero se evidencia la importancia de cada una y por ello tanto el talento humano como la tecnología se emplean de diferentes maneras, así como pueden evolucionar. Los túneles en los que se trabaja dentro del suelo, necesitan de profesionales con una preparación y visión distinta a los que laboran en una mina superficial, ya que los conocimientos requeridos se enfocan en la geotécnica, mecánica de la roca, el soporte del túnel, ventilación, así como la automatización de maquinaria.

Apaza (2020) menciona que los ambientes subterráneos son muy nocivos para el personal de trabajo debido a la exposición continua al polvo, gases y una considerable disminución o en algunos casos ausencia de iluminación, que pueden significar un peligro para la vida de los mismos. Es así que se han propuesto medidas en esta industria que se enfocan directamente a la automatización de estas tareas, indicando que el futuro está en que las máquinas realicen las actividades internas.

Los avances tecnológicos respaldan esta visión con diferentes avances para llevar las tareas a una automatización en las minas subterráneas. Es así que empresas como Río Tinto, así como BHP Billiton han instalado más de 10.000 sensores en operaciones bajo tierra en Arizona, con la

finalidad de supervisar la temperatura de los trabajadores y así no superar el límite que el cuerpo puede soportar. Además, la empresa Río Tinto, también ha invertido en cargadores autónomos para que funcionen netamente con energía eléctrica. La minera ha llegado a un punto en donde toda empresa apoya al planeta y las iniciativas verdes y, más aún es que, la mayoría de los inversionistas provienen de otros países, por lo que la minería subterránea realizada en Perú, no es ajena a esta situación que, podrá evidenciarse en años próximos.

Los cambios en la minera subterránea no solo se relacionan con el avance tecnológico, sino también con las enseñanzas luego de la pandemia de COVID-19. La empresa minera Buenaventura (2021) indica que los gases y la caída de rocas son los principales causantes de mortalidad dentro de las minas y que es necesario una automatización y mecanización de tareas, con lo que se reduce el error ocasionado por el personal y así evitar la pérdida de vidas humanas. Aunque es de rescatar que, a raíz de la pandemia, los procesos se realizan con un mayor orden y así mejorar la calidad de vida de los trabajadores.

En lo concerniente a equipos y maquinaria utilizados en la minería subterránea dentro de la minería chilena, la empresa estatal Codelco en 2020 innovó con el debut del primer camión LHD híbrido. El equipo se encarga de cargar, transportar y descargar el mineral, siendo su operación a nivel industrial 100% eléctrica, no cuenta con caja de cambios, empleo de Diesel o accionares mecánicos, sino que es impulsado por energía motriz. Ahora, en el territorio peruano, la proveedora Komatsu negocia las pruebas en el país, ya que, se cuenta con más de 18 equipos, siendo los predominantes los 4LD y el *dumper* de 16TD.

A su vez, la empresa peruana Resemin dedicada a la fabricación de equipos para ser usados en minería subterránea, en el 2019, manifestó que, están en un proceso de cambio y el giro apunta hacia que los equipos cuenten con baterías recargables. Esta empresa ha fabricado más de 588 equipos dedicados la MST, y dentro de su stock se encuentran diseñados tanto con motor a Diesel como eléctrico. La meta a alcanzar es que sobre todo dentro de la perforación que los jumbos eviten el consumo del combustible fósil, en las diferentes y más reconocidas mineras del Perú.

Estas innovaciones también se han dado en años posteriores, ya que, en 2018, la empresa peruana Epiroc, ubicada en la región de Pasco, emplea un equipo BEST 7 con batería del grupo Atlas Copco. Este equipo ha trabajado a alturas de 4.600 msnm, llegando a profundidades de hasta

500 metros por debajo de la tierra, con una capacidad de carga de 4 toneladas. La innovación con el equipo ha generado resultados positivos al ser un 80% más eficiente al emplear energía eléctrica y 15% más rápido en la carga del mineral. Además de necesitar menos ventilación, con una temperatura menor a los 16 °C, que generan las máquinas a Diesel. Es así que la operación en la mina subterránea se puede realizar hasta 16.000 horas de trabajo antes de necesitar mantenimiento y la inversión supera por poco a la de un cargador subterráneo convencional.

Con base en la revisión realizada desde la extensión general de los títulos mineros que existen, están en proceso y los posibles a futuro, hasta las innovaciones que han dado dentro de los últimos años dentro de la minería subterránea, se demuestra que este método de explotación es uno de los más empleados y su relación directa con los proveedores de maquinaria y equipos genera interés con varias empresas, que, desde una visión ambiental e innovadora, desde hace algún tiempo han optado por automatizar procesos y cambiar el consumo de derivados de petróleo por energía eléctrica.

A su vez, es importante recalcar que al incluir dentro de la tecnología el uso de energía eléctrica, también representa que existen maquinarias automáticas, como las perforadoras, jumbos con operación a distancia, que como se mencionó anteriormente ya existen en países como Chile, pero la acogida en Perú se nota a futuro. Es así que tanto el uso de energía limpia como la automatización presentan una herramienta para incrementar la productividad y fortalecer la seguridad en el sector minero.

3.2. Desafíos de la minería subterránea en el sector productivo del Perú

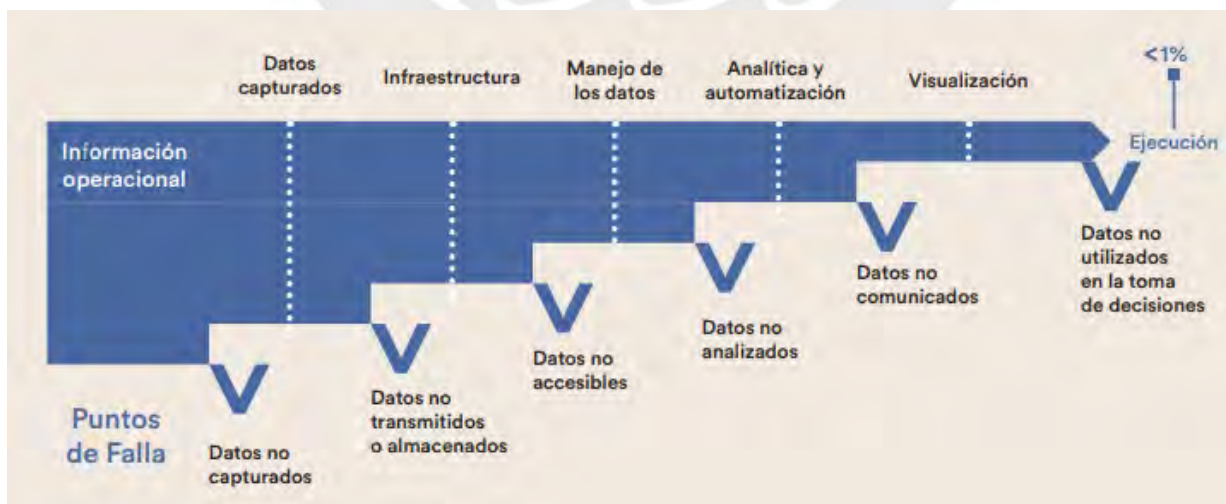
Varios son los desafíos a los cuales se enfrenta la MST, ya que los esfuerzos están dedicados en resolver dos aspectos fundamentales. El primero se relación con la comunicación entre la sociedad minera para conseguir un desarrollo sostenible enfocado a la aplicación de diferentes áreas tecnológicas, debido a que los proveedores de estos insumos se han vuelto imprescindibles para la correcta ejecución del proceso. Y, el segundo está centrado en los recursos que se generan de la minería sean sostenibles y eficientes para así lograr una distribución e inversión beneficiosa, para todos los actores dentro de la actividad minera, haciendo énfasis en firmas mineras, proveedores, talento humano, comunidades e instituciones públicas, siendo el fin principal mejorar la calidad de vida.

En el ámbito técnico, las empresas mineras no presentan un problema relacionado con la capacidad profesional de las personas encargadas de la operación, ya que dentro de sus nóminas todos los técnicos se han formado para aplicar tecnologías nuevas e innovadoras, así como grupos de empresas que incentivan este hecho pese a las condiciones adversas. Uno de los sectores como el cobre, ya han optado varias medidas para enfrentar la disminución constante de la ley de mineral en las operaciones. Este tipo de medidas han evidenciado que existen varios beneficios relacionados con la productividad y eficiencia, de la aplicación de tecnologías, como nueva maquinaria.

Es así que no solo un beneficio está en las máquinas para la realización del trabajo en campo, sino al considerar a la minería en la cuarta revolución industrial se han modernizado aspectos digitales como el flujo de información en tiempo real para que exista una conexión a nivel de empresa y los centros de mando. Por lo que, la dificultad de compartir información con los gerentes de la empresa se ha reducido de una manera oportuna y óptima para la toma de decisiones (Figura 2). De este modo una firma minera ha superado la visibilidad instantánea de la producción, calidad, tiempos de trabajo, estado de las maquinas, entre otras. El desafío enfocado a conseguir una operación en funcionamiento óptimo y eficaz, está a la puerta, pero la principal brecha es abordar la industria 4.0 dentro de la minería tradicional.

Figura 2.

Las empresas mineras solo usan una pequeña parte de los datos que generan



Fuente: Durrant-Whyte et al. (2015).

Es por ello que algunos de los desafíos existentes son los siguientes:

- Fijar la continuidad de la empresa minera luego de la transición de los sistemas heredados
- Lograr combinar las habilidades del personal de trabajo para que se facilite la competencia de la empresa en el mundo digital.
- Gestionar la incorporación de nuevas asociaciones empresariales, siendo que comúnmente la analítica y la autorización no se incluyen en el ámbito minero tradicional
- Lograr el punto de equilibrio donde la introducción de nuevas tecnologías no afecta a la competitividad futura.
- Impulsar la inversión para que el flujo monetario evite la interrupción de márgenes de ganancia.

Es así que la existencia de las tecnologías de la Industria 4.0 en una mina, presentan un desafío relacionado directamente con los costos de su implementación, siendo esta limitante la que no permite que se integren sistemas fragmentados como entre la planta de beneficio y la operación minera, es decir la comunicación esta obstruida y no existe facilidad para informar el estado óptimo de la operación. Sishi y Telukdarie (2020) indican que una mina puede convertirse en semi inteligente con la incorporación de tecnologías 4.0 como un mecanismo de integración de sistemas de fabricación y los procesos, al emplear software para el monitoreo de la operación basado en SAP ERP, los resultados fueron una visibilidad en tiempo real del estado general de la mina. Este antecedente refleja que no es necesario cambiar todas las condiciones de trabajo, sino una transformación digital puede ser innovador e incentivar a la mejora de la productividad.

Ledwaba y Mutemeri (2018) indican que los desafíos más importantes son: el apego a los métodos tradicionales, la gran inversión económica necesaria para a la implementación de tecnología, el desconocimiento por parte de las empresas respecto al impacto positivo de estas soluciones tecnológicas, la conectividad de internet dentro de una mina para la correcta operación de la maquinaria y la masificación ya que, hasta no estar probada la tecnología las mineras no se sienten atraídas en invertir y rechazan su uso.

Es así que todos estos factores se relacionan con la competitividad, que, en el caso de la MST peruana, existe reducida información con la cual realizar un análisis con datos de empresas mineras. Pero para establecer que tan competitivo es un sector se requiere conocer la capacidad de

competir frente a otros sectores tanto local como internacionalmente. El Ranking del *Fraser Institute* en 2017 indica que la posición de Perú frente a otros países es buena, es decir competitivo a nivel regional e internacional, estando segundo luego de Chile, aunque a nivel internacional existe una brecha relacionada con la percepción de políticas en lo que concierne a regulación ambiental, normativa, régimen tributario y estabilidad política. A su vez, las mejores prácticas de potencial minero, en donde se clasifica en función al atractivo geológico, el Perú está ubicado en la octava posición, siendo los primeros Indonesia, Finlandia y Chile.

En este marco para lograr que la minería peruana pueda implementar y transformarse digitalmente requiere ser competitiva para así atraer inversión y superar la dificultad monetaria. Con esto la competencia con otros países se reduce para conseguir capital y adoptar tecnologías digitales se puede volver una realidad en el territorio peruano. En términos de atracción el Perú se encuentra en el sexto lugar de países atractivos para inversión minera según el Instituto *Behre Dolbear* en 2015. Pero a su vez, este posicionamiento del país se ve opacado ya que la firma *PwC Mining Survey* (2016) indica que de 137 naciones el Perú está en el puesto 116 de competitividad en términos de ecosistema de innovación y preparación tecnológica e infraestructura. Es decir, la aplicación tecnológica no se evidencia en el país lo que influye negativamente en la visión del mundo del sector minero peruano.

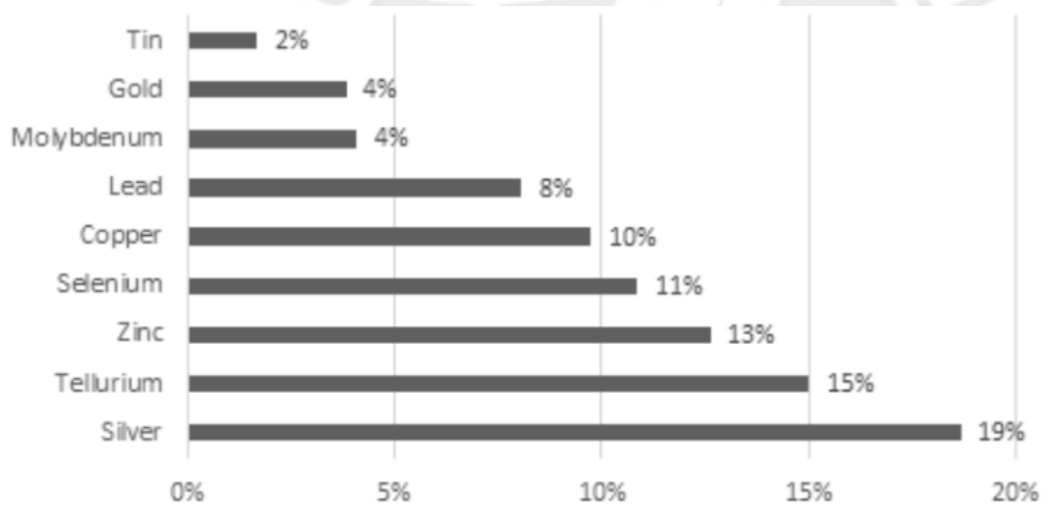
Perú es uno de los países que sumado a los desafíos expuestos aún realiza la mayoría de sus actividades manualmente, como el envío de la planificación de la producción (PP) desde el sistema ERP a los centros de control de operaciones, el registro de la producción real desde la planta de producción al sistema ERP, la creación de un programa de mantenimiento y la elaboración de informes sobre el estado del mantenimiento, por nombrar solo algunas (Nurmianto *et al.*, 2015). La industria no aprovecha al máximo las oportunidades tecnológicas disponibles y nuevas para integrar e informar desde sistemas desarticulados que funcionan sin conexión entre ellos. Estas lagunas podrían resolverse utilizando tecnologías que integren y hagan que los sistemas se comuniquen y compartan información entre sí. La visualización de datos podría ayudar con los indicadores clave de rendimiento (KPI) y otros requisitos de información (Iarovyi *et al.*, 2016).

3.3. Productividad de la minería subterránea en el Perú

Al referirse a productividad, como se indicó en el apartado 1.2.2, existen varios índices para medir y cuantificar esta variable. En el caso del país en términos monetarios, McKinsey (2013) indica que los costos de energía son los más bajos de América Latina, así como los de exportación. En caso de los costos laborales Perú presenta una reducción de tres veces a comparación de Chile, Estados Unidos, Canadá y Australia. Pero la legislación es un inconveniente debido a que la aprobación de las concesiones mineras es compleja en relación al país vecino Chile, por trámites de exploración y conflictos sociales. La posición número cinco a nivel mundial de producción de minerales, convierten al Perú en un país con altos niveles de productividad en lo que concierne a la disponibilidad de recursos, tanto en volumen como variedad (Figura 3).

Figura 3.

Recursos mineros de Perú en porcentaje



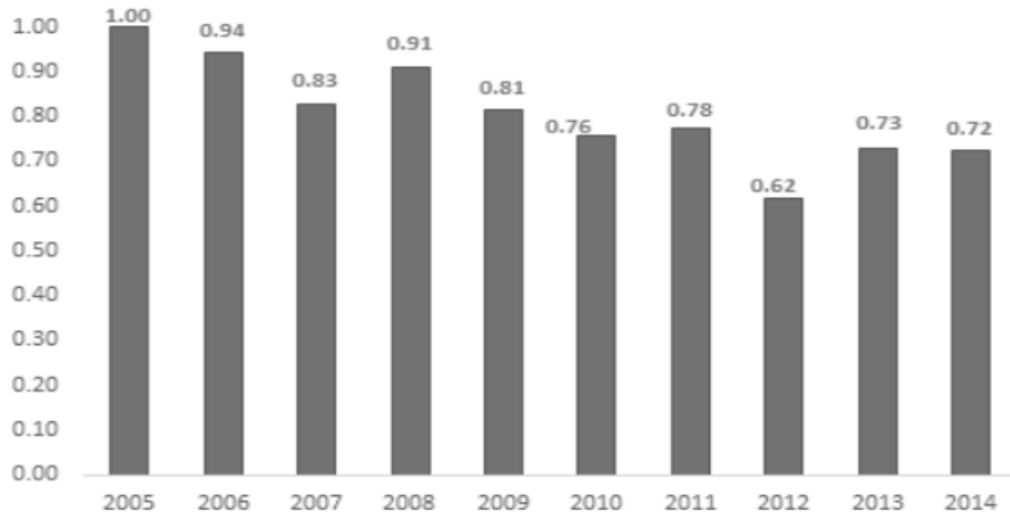
Fuente: Molina (2018)

Es así que la productividad minera de los minerales en Perú, tiene un potencial para ocupar los primeros lugares a nivel mundial. En este marco se reitera que la innovación tecnológica es una vía sustancial para que mejore el proceso productivo que incremente la productividad, pero como se evidenció anteriormente en lugar de que exista un aumento la tendencia esta alineada a una disminución de este parámetro, que el MINEM indica se ha reducido en un 28% desde el 2005

hasta el 2014 (Figura 4), siendo una de las causas el precio reducido de los metales entre 2012 a 2016.

Figura 4.

Productividad laboral en el Perú del 2005 a 2014



Fuente: Molina (2018)

Varios son los factores que pueden inferir en que se incremente la productividad, siendo uno de ellos mejorar la asignación eficiente de componentes de producción entre empresas y otros. En este marco se incluyen a las metas de cada empresa minera en las que incentivan la capacitación laboral, aumento de inversión y gastos en I+D. Es así que conseguir incrementar la productividad total (aumentar la tecnología en la empresa) y la productividad laboral (bienestar e inversión en talento humano) es posible en nuevos proyectos al incluir mayores gastos I+D, vínculos internacionales y la transformación digital del proceso (Molina, 2018). Este análisis refleja una oportunidad para incrementar la productividad minera de Perú, ya que desde el 2017 se han recuperado los precios de los minerales.

3.4. Tecnología aplicada actualmente en la minería subterránea peruana

En toda la MST, ya existe un gran número de maquinarias y tecnologías con altos rendimientos productivos, así como equipos mineros que apoyan el arranque, transporte y sostienen los túneles con un nivel tecnológico especialmente diseñado para todas las actividades

mencionadas (Energía JCYL, 2021). El hecho es que, pese a todo el nivel alcanzado tanto en equipos como en software disponible, los desafíos mencionados en el apartado 2.2, son la muestra del nivel que puede alcanzar una empresa minera, siendo competitiva, atrayendo inversión y logrando una productividad considerable de los minerales extraídos. Sin embargo, es importante analizar el nivel de tecnología actual y para ello la revista Rumbo Minero Internacional (2015) indica varias tecnologías aplicadas en la minería subterránea peruana, son ofertadas por empresas como ABB, Atlas Copco, Cidelsa, Ferreyros, entre otras.

La compañía suizo – sueca ABB está presente en el mercado por más de 60 años y se considera líder en el mercado en lo que concierne a tecnología de energía y automatización. Esta empresa se especializa en MST con sistemas automatizados de ventilación y electrificación. Las soluciones que oferta ABB son tres problemas críticos que son: automatizar la ventilación, el acarreo de los minerales y el sistema eléctrico, mismos que son altamente demandados en Perú. El producto estrella se denomina *SmartVentilation*, que provee de eficiencia y una calidad de aire idónea para el trabajo que resulta en ahorros de hasta el 50% de energía por año, los niveles de este sistema son los siguientes:

- Básico: También denominado como *SmartBasic*, se trata de un nivel en el cual se implementa un control elemental de ventiladores, compuertas y puertas de ventilación, siendo monitoreado la calidad de aire por sensores de flujo, que reducen costos energéticos y así asegurando la seguridad en la operación.
- Medio: *SmartMid*, es el segundo nivel que representa una solución completa a la ventilación, por lo que existe un control automático de todo el sistema formador por los ventiladores, compuertas y puertas de ventilación por lo que constantemente se proporciona aire fresco con un ahorro del 30 a 50% en energía.
- Perfecto: *SmartPerfect*, es una optimización completa de la ventilación dentro de la mina, siendo el sensor que retroalimenta de información al flujo de aire. Es así que el proceso es totalmente en línea con aprendizaje automático, siendo el control total de los flujos de aire en la mina, pero en tiempo real.

La empresa Atlas Copco Peruana S.A. brinda sus servicios desde los años 50 con ventas sustanciales en la industria minera subterránea. Entre los productos enfocados al ciclo minero se

encuentran los tradicionales túneles *Boomer*, producción Simba, refuerzos de roca *Boltec* y *Cabletec*, para carga *Scooptram*, transporte *Mine Truck*. Además, equipos para el desatado de roca *Scaler*, carguío ANFO y máquinas para Shotcrete, así como ventilación *Serpent*. Es así que, pese a su gama de productos ya posicionados en el mercado, Atlas invierte grandes sumas monetarias en sistemas computacionales y de automatización para que la productividad del sector minero subterráneo incremente, siendo algunos productos los destinados a la perforación de túnel, empernado de rica y de acarreo.

CIDELSA en cambio, dentro del Perú lleva 30 años en el mercado siendo especialistas para solucionar problemas de ductos de ventilación al ser fabricantes directos. A nivel de país el 70% de explotaciones de MST están abastecidas por esta empresa. Es así que el producto más demandado por sus clientes en minas dentro del subsuelo son las mangas de ventilación, siendo claro para sus ventas que a pesar de que comercializan geomembrana para las minas superficiales, constantemente incrementa la exploración y explotación subterránea. Por lo tanto, han invertido en tecnología de polietileno y PVC, siendo la primera resistente como permeable y la segunda presenta sellado de alta frecuencia. A su vez, luego de su alianza con Howden sueco, esta empresa apunta a vender ventiladores automatizados para el ahorro del 45% de energía.

Ferreyros, es una empresa que impulsa el desarrollo de la minería desde hace 90 años y 70 años como distribuidor de Caterpillar. Es así que en la minería subterránea han determinado en 2014 una venta considerable de equipos, servicios y repuestos, siendo los cargadores de bajo perfil CAT altamente comercializado en el mercado superando el 90% del mismos por características como la productividad alcanzada. Entre los equipos estrella están el cargador R3000H (diésel) y R1600H (eléctrico), porque son adquiridos en mayoría para incrementar la producción y productividad. El primer cargador cuenta con ventilación reducida, incluyendo un sistema de monitoreo CMS. En el caso del segundo reduce hasta un 7% de gasto en combustible, así como la contaminación en el ambiente subterráneo. Finalmente, esta empresa plantea soluciones más tecnológicas como sensores de proximidad del personal, así como sistemas para transmitir los indicadores de productividad de los equipos a un monitor.

Otra empresa que resalta es Obras Subterráneas, proveniente de España en donde opera desde el año 1952, principalmente se dedica a construir túneles y cavernas. Es así que dada la

trayectoria es líder a nivel mundial en el sector minero subterráneo, lo que los ha llevado a innovar en el abandono de túneles con pequeñas secciones por mayores. Dentro del Perú esta organización ha introducido tecnología automatizada para construir túneles y controlar la seguridad de las partes interesadas, por lo que resaltan la perforación hidráulica, equipos de gunitado y tuneladoras.

Es así que luego de revisar la tecnología aplicada, es evidente que en el aspecto mecánico los equipos tienden a ser eléctricos para mejorar el ambiente subterráneo de la mina y funcionalmente los sistemas de información, están dejando de lado los reportes realizados manualmente para convertirse en digitales. Es decir, la transformación digital en la minería subterránea es evidente, aunque los desafíos de la misma, presentan una adopción reducida en las operaciones mineras, siendo la reputación de las firmas proveedoras un factor importante, así como los casos de éxito.

3.5. Caso de estudio

3.5.1. Productividad de la operación

El caso de estudio está centrado en la empresa minera NEXA, dentro de las operaciones realizadas en la mina Cerro Lindo. La producción abarca más de 6 millones de toneladas, con avances de 33.500 metros anuales, así como relleno de pasta de más de 1 millón y medio de m³. En esta mina la productividad está medida por indicadores como Extracción (en toneladas, t), Avances (en metros, m), Taladros largos (en metros, m), Cable Botting (metros inyectados, m), Shotcrete (metros cúbicos lanzados, m³), Relleno en Pasta (metros cúbicos rellenados, m³), Desmante (m³) y Volumen de Vacíos (m³).

Entre estos varios indicadores, lo más importantes en términos operativos son los tres primeros. En la extracción, se habla del flujo del mineral extraído del interior de la mina y cuantificado en medidas de peso, en este caso en toneladas. Este flujo implica el carguío del mineral roto mediante *Scoops* (cargadores de bajo perfil) a camiones que se encargan de transportar el mineral a superficie, con destino a la planta de beneficio. El avance expresado en medida de longitud, como es el metro, se refiere a el largo alcanzado en los frentes de trabajo de la mina en un período de tiempo establecido (día, mes o año), este indicador mide el rendimiento de la operación. En esta actividad se desarrolla las galerías, los cruceros, rampas, entre otras labores

mineras que permiten preparar las zonas o tajos de mineral para hacer posible su explotación. A su vez, la perforación de taladros largos, se consideran dentro de este ciclo minero como la ejecución de orificios circulares llamados taladros, los cuales pueden ser de diferente diámetro dependiendo del diseño de mallas de perforación, máquina a utilizar, tipo de rocas entre otras variables. Estos taladros pueden realizarse de manera positiva, negativa o en forma de abanico en el macizo rocoso. Luego de ser ejecutados, estos son llenados con explosivos que junto a diferentes accesorios de voladura llevan a cabo el proceso de fragmentación de la roca.

Es importante resaltar que la operación hasta el año 2021, registraba todos los indicadores productivos mencionados en reportes realizados en hoja de cálculo de Excel, con lo que toda la productividad, se documentaba, pero sin un análisis hasta llegar la evaluación mensual, de acuerdo a la planificación de la mina. Es así que, para conseguir los objetivos planteados por NEXA se vigila la productividad dentro de la mina, ya que la producción se monitorea por medio de metas alcanzables y establecidas dentro del plan de minado por mes y por año. Es por ello que en la siguiente tabla se presentan los principales KPIs, reportados por la empresa en el año 2021.

Tabla 2

Principales KPIs empresa minera NEXA 2021

Mes	Extracción de mineral (t)	Avances Mina (m)	Taladros largos (m)
Julio	528,116	2,704	31,707
Agosto	556,429	2,906	36,255
Septiembre	541,749	2,900	30,102
Octubre	582,183	2,989	34,981
Noviembre	573,362	2,921	32,993
Diciembre	517,985	2,290	33,613

Nota. Datos tomados del valor REAL de cada mes

Fuente: NEXA (2021)

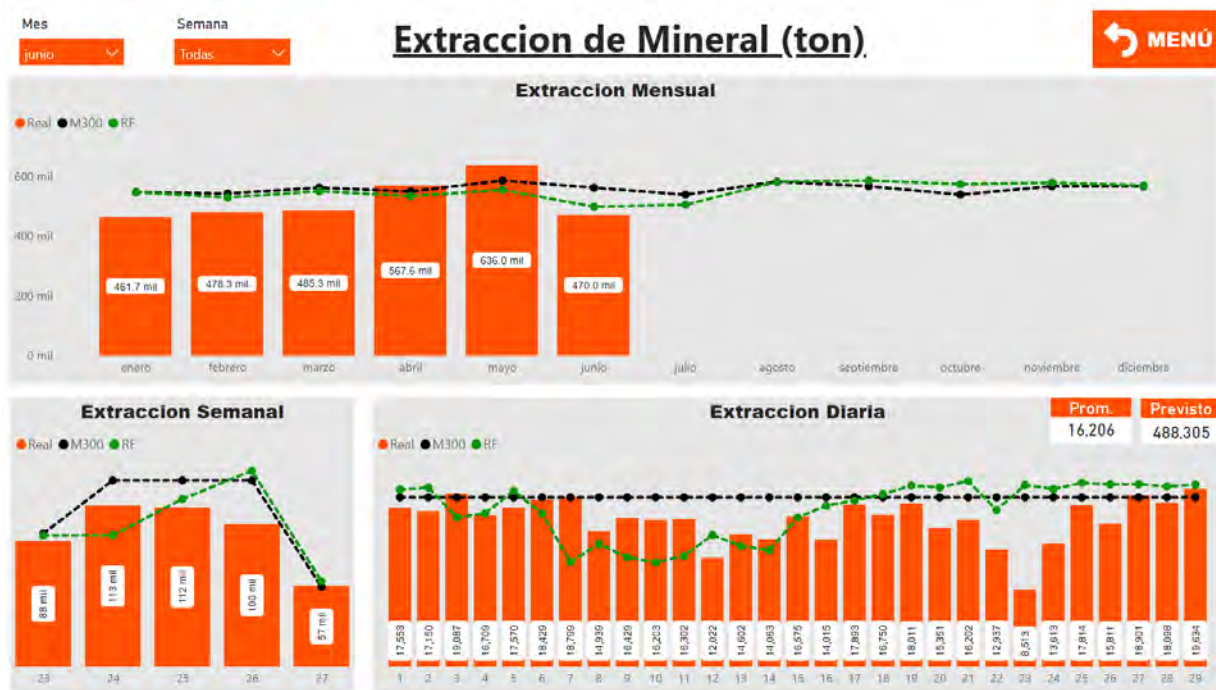
Como indica la Tabla 2, los indicadores de productividad de la mina, reflejan el estado operacional, pero al ser recopilados de varios archivos Excel, no se identifica de manera dinámica los cambios sucedidos día a día, semana a semana inmediatamente o el cumplimiento de la proyección de los planes mensuales y el presupuesto del año. Esto debido a que, se presentan al

finalizar cada mes y así no existía un control de productividad o la identificación de puntos críticos o desvíos con alguna tendencia para tomar medidas de acción en el más corto plazo posible.

En cambio, a finales del 2021 e inicios del año 2022, el cambio de la cultura minera de la empresa comenzó a tomar más fuerza en el seguimiento para el cumplimiento de los objetivos operativos, lo que llevo a implementar mejores controles y la necesidad de tener herramientas que permitan esto, en el menor tiempo posible y de la manera más adecuada. Esta nueva visión trajo consigo variaciones en la operación entre las cuales resalta la compilación de los reportes de la mina en datos de tiempo real y que alimentan una base de datos en línea dentro de la plataforma POWER BI. Con esta inclusión tecnológica la mayor característica de impacto es la consulta de datos, la oportuna toma de decisiones, la revisión de tendencias negativas, análisis de anomalías y que cada día pueden cargarse comentarios, acerca de la labor realizada. En la siguiente figura, se observa el tablero de control de la plataforma con los principales KPI.

Figura 5

KPI de Extracción de Mineral (ton)

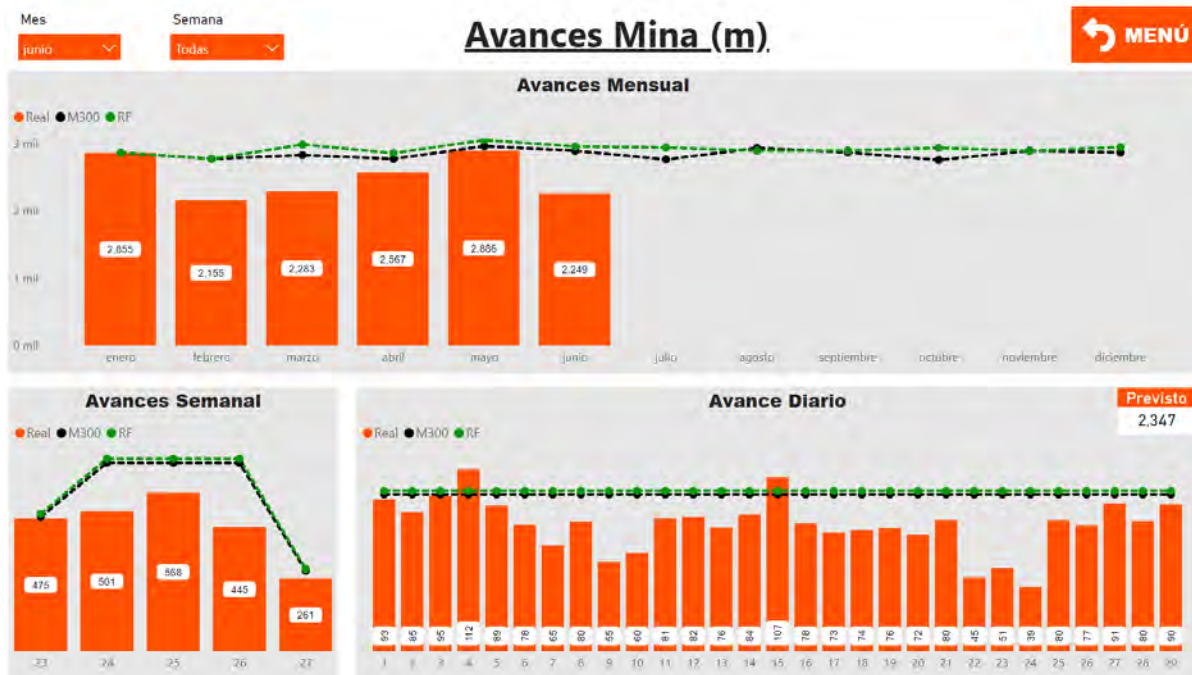


Nota. Real = metros reales del mes (color naranja), M300 = presupuesto del año (color negro), RF = proyección de los planes mensuales (color verde). Los datos de mes de junio aún no son los finales.

Fuente: NEXA (2022)

Figura 6

KPI de Avances mina (m)

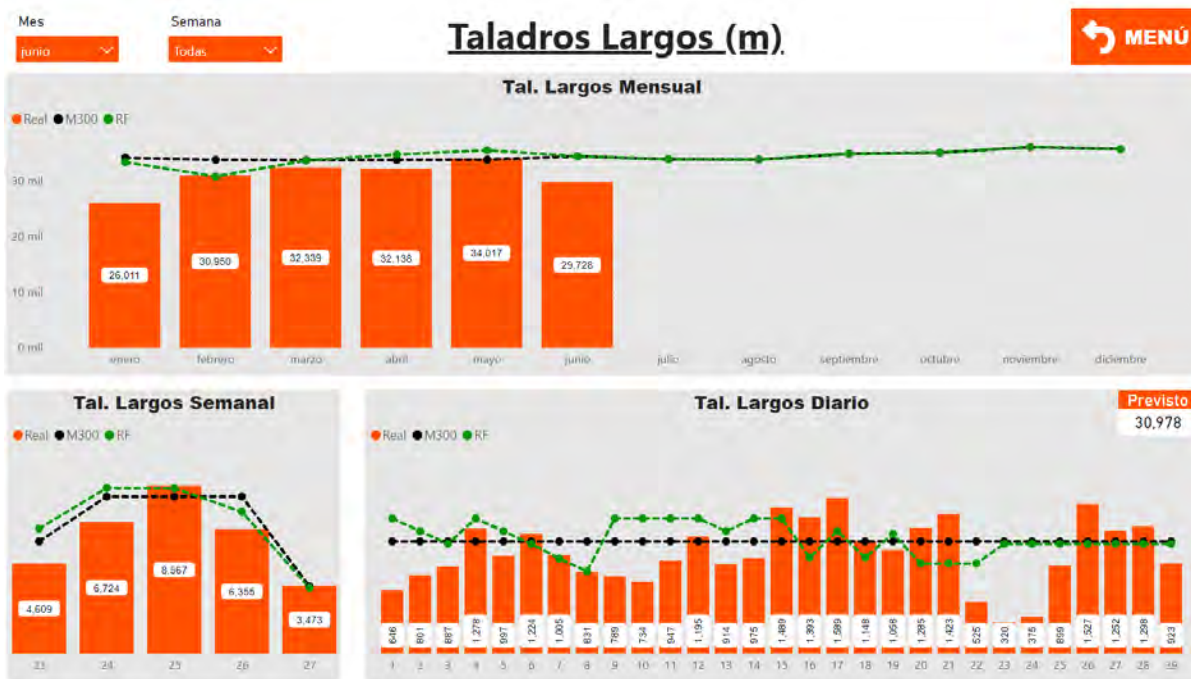


Nota. Real = metros reales del mes (color naranja), M300 = presupuesto del año (color negro), RF = proyección de los planes mensuales (color verde). Los datos de mes de junio aún no son los finales.

Fuente: NEXA (2022)

Figura 7

KPI de Perforación de Taladros largos (m)



Nota. Real = metros reales del mes (color naranja), M300 = presupuesto del año (color negro), RF = proyección de los planes mensuales (color verde). Los datos de mes de junio aún no son los finales.

Fuente: NEXA (2022)

En la Figura 5, 6 y 7, se observan los indicadores de Extracción de mineral, Avances de Mina y Taladros largos dentro de la plataforma digital POWER BI. Este cambio dentro del manejo de datos genera un reporte tanto diario, semanal, como mensual de manera dinámica, se puede revisar días, semanas y meses anteriores y proyecciones futuras que nos ayuden a entender la presencia de algún desvío y a optar por la solución más adecuada. Dentro de las gráficas el avance diario es una herramienta vital para detectar cuando la tendencia real presenta bajas, respecto a los días anteriores, ya que de esta forma se ponen en marcha planes de acción para que la producción real en la mayoría de los casos, supere a las proyecciones y al presupuesto del año. Por lo tanto, de esta manera incrementa la productividad con base en toma de decisiones basado en la curva de aprendizaje de los datos en tiempo real de la mina Cerro Lindo.

3.5.2. Tecnología empleada

Las operaciones realizadas en la mina Cerro Lindo, cuenta con una flota de equipos dentro de los cuales resaltan jumbos frontoneros, simbas y varios *Scooptram* en las marcas Epiroc, ITH y CAT, respectivamente. En lo concerniente a la marca son de calidad internacional empleadas a nivel mundial y estas máquinas operan durante varias horas y en dos turnos dentro de la mina.

Los jumbos son equipos diseñados para ejecutar labores horizontales, siendo su función la de perforar en diferentes frentes para la preparación de tajos o bloques de mineral que luego serán extraídos. Esta máquina cuenta con una o varias perforadoras que están colocadas sobre brazos articulados con un accionamiento hidráulico, siendo ese su principal principio de funcionamiento. En la mina Cerro Lindo, este tipo de equipo cuenta con un monitor de avance pero que no es automatizado, ya que, en este modelo antiguo solo indica los metros de perforación.

Las simbas, son equipos que cuentan con perforadoras con las que realizan los taladros largos, concepto explicado en el punto 2.5.1, en el caso de Cerro Lindo la longitud de estos taladros puede ser de hasta 30 metros, ya que esa es la distancia de diseño promedio del tajeo entre diferentes subniveles. Para el año 2022 ya se cuenta con equipos que son programables para la perforación automatizada sin la presencia del operador de manera continua.

Con respecto a los Scoop, cargadores de bajo perfil, son los encargados de cargar el mineral a los camiones, actualmente la mayoría de la flota cuenta con la tecnología de control remoto, por la cual el operador no está expuesto directamente al peligro dentro de la máquina.

Además de los equipos, la mina Cerro Lindo hasta finales del 2021, para la contabilización del material acarreado, no pesa los camiones que transportan este material, sino llevan un registro digital de los pesos aproximados en función a la capacidad de transporte de cada camión. Esta característica dentro del control y seguimiento de producción presenta ciertos inconvenientes relacionados con la correcta cuantificación de los indicadores de productividad relacionados a esta etapa.

Finalmente, luego de la recolección de información relacionada a la tecnología dentro de la mina Cerro Lindo, se verificó que para el año 2021, el tratamiento digital de los datos, se realiza únicamente como registro en hojas de cálculo de Excel, no existen plataformas o software

especializados para el manejo, siendo el almacenamiento netamente en los discos duros de los computadores y servidores de la compañía. Estos datos en muchas ocasiones no estaban relacionados y las diferentes áreas no compartían datos entre sí.

En el ingreso del año 2022, en relación con los equipos esta realidad cambia con la incorporación de maquina automatizada que puede entregar los registros pero que a su vez pueden cargarse durante cada guardia a la base de datos que alimenta la información en tiempo real. Entre estos equipos resaltan el Jumbo Frontonero de la marca Epirco, modelo RB282, la Simba ITH – DL421 y los cargadores de bajo perfil CAT – R2900G y R3000G, los más grandes en la minería subterránea peruana. También para mantener un control más eficiente de los camiones de material acarreado, se incorpora una balanza para determinar la diferencia exacta del camión al ingreso y salida. La empresa NEXA, como nueva tecnología a emplear está en la fase inicial para incorporar a su operación el software HEXAGON METROLOGY con la finalidad de la implementación de un sistema de gestión de datos y control de procesos para la conexión de diferentes departamentos por medio del hilo digital, pionero dentro de la minería subterránea del Perú.

3.5.3. Transformación digital

Durante el año 2021 la empresa minera NEXA, informa que no se considera ningún tipo de transformación digital, tanto en sus equipos, maquinaria y manejo de datos. Esto como una oposición frente al costo que representa para la organización, principalmente por la cantidad de inversión requerida y una cultura minera apegada al método tradicional, que se refleja como la no necesidad de realizar este proceso, debido a que no se considera trascendente o repercute en un incremento de las ganancias.

Luego que la empresa fuera adquirida por una firma minera brasileña, el cambio de administración evidenció una tendencia de una nueva cultura minera. En especial debido a que la fusión entre compañías atrae a gerentes con experiencia en automatización, que reconocen este aspecto como positivo y por ello deciden automatizar e implementar acciones para que se facilite el trabajo, sin que los costos sean un desafío, sino como una herramienta de trabajo vital para la realización de tareas.

Figura 8

Reporte en Excel de la empresa minera NEXA

REPORTE DIARIO DE OPERACIONES - CERRO LINDO

30/11/2021

SSMA

DESCRIPCION	MTD				YTD				Movil YTD			
	ACUM.	M300	VAR.	% CUMPL.	ACUM.	M300	VAR.	% CUMPL.	ACUM.	M300	VAR.	% CUMPL.
TFCSA	0.00	1.90	-1.90		2.77	1.90	0.87		2.79	1.90	0.89	
TIN	0.00	3.40	-3.40		3.23	3.40	-0.17		3.37	3.40	-0.03	

MINA

DESCRIPCION	Diario					Acumulado del mes					Acumulado al año			
	REAL	M300	ForeCast	Real vs ForeCast		REAL	M300	ForeCast	Real vs ForeCast		REAL	M300	VAR.	% CUMPL.
EXTRACCIÓN MINA (TMS)	18,318	19,179	19,971	-1,653	92	544,549	575,376	570,102	-25,553	96	6,446,379	6,900,833	-454,453	94
AVANCE (m)	125	81	101	24	124	2,944	2,433	3,035	-91	98	34,388	32,484	1,903	106
AVANCES DESARROLLO (m)	54	20	34	20	160	1,094	596	1,020	74	108	11,477	8,964	2,513	129
AVANCES PREPARACIÓN (m)	63	54	56	7	113	1,701	1,631	1,685	16	101	22,015	21,024	990	105
AVANCES EXPLORACIONES (m)	7	7	11	-4	68	149	206	330	-181	46	896	2,496	-1,600	36
AVANCE NEXA (m)	40	27	30	9	131	717	808	908	-191	80	9,009	10,332	-1,324	88
AVANCE INCIMMET (m)	38	22	26	12	147	852	659	774	77	111	9,275	8,606	668	108
AVANCE AESA (m)	48	32	45	2	106	1,375	967	1,352	22	102	16,105	13,546	2,559	119
PREPARACIÓN (m)	63	54	56	7	113	1,701	1,631	1,685	16	101	22,015	21,024	990	105
DESARROLLO (m)	54	20	34	20	160	1,098	596	1,020	78	108	11,477	8,964	2,513	129
EXPLORACIÓN (m)	7	7	11.0	-4	68	149	206	330	-181	46	896	2,496	-1,600	36
CABLE BOLTING (m INYECTADOS)	801	981	1,047	-246	77	22,412	29,440	31,417	-9,005	72	269,645	353,350	-83,705	77
SHOTCRETE (m3)	272	228	307	-35	89	8,976	6,830	9,212	-236	98	107,506	88,980	18,527	121
RELLENO PASTA (m3)	4,814	4,500	4,500	314	107	134,112	134,999	130,223	3,889	103	1,558,449	1,636,263	-77,814	96
RELLENO DETRITICO (m3)	0	500	500	-500	0	16,341	15,000	15,000	1,341	109	145,431	182,000	-36,569	80
PERFORACIÓN T. LARGOS (m)	1,091	1,155	1,200	-109	91	32,994	34,665	33,230	-236	100	387,036	418,777	-31,741	93
DESMONTE (m3)	4,297	2,833	2,833	1,464	152	119,389	85,000	85,000	34,389	141	942,625	1,031,333	-88,708	91

PLANTA

TRATAMIENTO (TMS)	22,853	18,503	19,500	3,353	118	559,955	555,092	560,850	-895	100	6,369,044	6,818,051	-449,007	94
ZINC EQUIVALENTE (tm)	1,232	583	781	451	158	18,843	17,477	19,618	-775	97	230,297	230,922	-625	100
Cc. Zn (TMS)	1,006	465	605	402	167	15,584	13,943	14,899	684	105	178,746	179,374	-628	100
Cc. Cu (TMS)	533	325	337	196	159	8,236	9,740	8,383	-147	99	109,772	116,935	-7,163	94
Cc. Pb (TMS)	128	33	102	26	126	2,224	975	2,459	-235	91	20,801	19,406	1,395	108
TOTAL (TMS)	1,668	822	1,044	624	160	26,043	24,659	25,741	302	102	309,319	315,715	-6,396	98
CONT. METALICO Zn (TM)	561	269	345	216	163	8,505	8,082	8,509	-4	100	100,706	100,326	379	101
CONT. METALICO Cu (TM)	147	85	88	59	167	2,156	2,548	2,196	-39	99	28,775	30,621	-1,846	94
CONT. METALICO Pb (TM)	87	20	68	19	128	1,398	614	1,644	-247	86	13,191	12,529	662	106
CONTENIDO METÁLICO Ag (miles Oz)	22.2	7.2	16	7	143	367.9	215.5	419.1	-51.3	88	3,813.7	3,249.3	564.4	118

Fuente: NEXA (2021).

Figura 9

Centro de control automatizado de la empresa minera NEXA



Fuente: NEXA (2022)

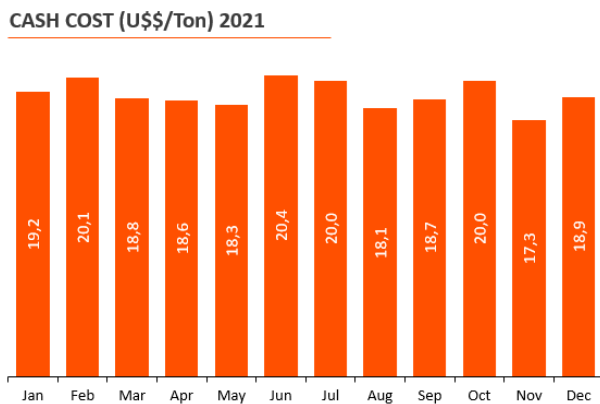
En la Figura 8 y 9, se observa el cambio notorio dentro de la empresa minera NEXA, en la Figura 8 se encuentra el reporte de la operación realizado en hoja de cálculo de Excel pero que no representa un medio para tomar decisiones referentes a la productividad. En cambio, en la Figura 9 se visualiza un centro de control automatizado, en donde toda la información se actualiza constantemente y presenta todo tipo de gráficas con los reportes, siendo evidente el cambio que puede presentarse al incorporar tecnología como plataformas digitales. Con ello la eficiencia incrementa, la comunicación es más fluida y se demuestra la utilidad de la tecnología en la minería subterránea.

3.5.4. Costos de operación

En el apartado de costos de operación (Figura 7), para el año 2021, se evidencia que, para los primeros cinco meses del año, el costo de operaciones mina tiene un promedio de 19.1 U\$\$/Ton, siendo este valor sin la implementación de algún tipo de transformación digital. En contraste para lo que va en el año 2022, se ha logrado obtener un costo de 17.7 U\$\$/Ton, evidenciando que el riesgo que la empresa percibía antes del cambio de administración, no generó un mayor gasto operativo.

Figura 10

Costos de operación mina Cerro Lindo año 2021

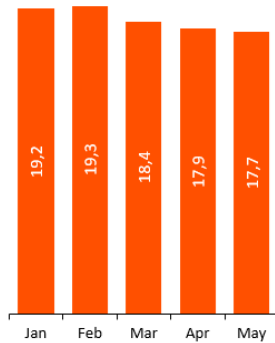


Fuente: NEXA (2021)

Figura 11

Costos de operación mina Cerro Lindo año 2022

CASH COST (U\$\$/Ton) 2022



Fuente: NEXA (2022)

En este marco, se evidencia que la cultura minera peruana se encuentra con un gran desafío al momento de incluir dentro de su operación algún tipo de transformación digital, automatización o tecnología enfocada en mejorar los procesos internos. La confirmación de esta oposición no representa significancia debido a que, el caso de estudio analizado, confirma que la tecnología, no resulta ser una inversión con pérdida de capital, sino un medio para incrementar la productividad, la competitividad y aumentar los réditos económicos de la actividad minera.

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN

4.1. Transformación digital y productividad en la minería subterránea

Hartlieb et al. (2022) indican que la minería inteligente es un concepto en el cual la tecnología se incorpora a las actividades tradicionales de la minería con lo cual pueden observarse los beneficios que brinda, como el incremento de la productividad. Así también Linkminers (2020) menciona que existe una brecha importante que se redujo luego del COVID 19 entre la tecnología con actividades humanas incluido el sector minero. En términos generales el caso de éxito ha demostrado que la implementación de cierto nivel tecnológico es una herramienta vital para el conocimiento neto de la productividad y que esta incrementa a medida que se emplean tecnologías como una plataforma digital. Es por ello que puede contrastar la realidad expuesta por los autores citados y con ello se valida la hipótesis de la investigación realizada.

Con lo expuesto en esta investigación podemos evidenciar que la transformación digital ha sido sin duda uno de los pilares más destacados de la minería subterránea, esto debido a la alta demanda de las compañías del rubro minero por simplificar sus procesos e incrementar exponencialmente su productividad de cara al rápido avance de la denominada revolución industrial 4.0. La transformación digital ha ayudado a poder integrar la información y mejorar su fluidez, lo que ha impulsado de manera sustancial el uso de sistemas dinámicos que permiten tomar mejores decisiones en tiempo real que ayudan a que los procesos sean más eficientes y efectivos. Se puede visualizar que, en un futuro próximo, la minería subterránea estará mejor posicionada con respecto al uso de tecnologías digitales, habrá un desarrollo más intensivo de herramientas que permitan simular diversos tipos de escenarios, controlar y monitorear los procesos críticos; además, se consolidará el uso de la inteligencia artificial para las distintas etapas productivas. Como apreciación personal, la transformación digital llegó para quedarse y desarrollarse cada vez más en la minería subterránea, incrementando la productividad y los resultados financieros de las operaciones mineras.

4.2. Productividad dentro de la empresa minera NEXA

La productividad en la empresa minera NEXA indica que previo a la implementación de algún tipo de tecnología en el año 2021 la extracción de mina fue de 573 mil toneladas métricas extraídas por mes, que luego de encontrar la transformación digital aplicando la plataforma POWER BI en 2022 se observó un incremento progresivo que alcanzó las 636 mil toneladas métricas en el mes de mayo. Por lo que se denota claramente como la productividad es mayor. Es así que resaltan las ventajas de la MST mencionadas por Energía JCYL (2021) por lo que se ha encontrado que una menor cantidad de escombros es beneficioso para la empresa minera, ya que la selectividad de la minería subterránea es un factor indispensable en la remoción de cierta cantidad roca y no grandes superficies.

Robles y Foladori (2019) resaltan además una característica única de este método de explotación ya que, la durabilidad de una mina subterránea brinda un espacio en el cual se puede trabajar por un período de tiempo mayor, que, como se evidencio en el caso de estudio, la empresa labora por más de 15 años en la mina Cerro Lindo. Esto ha hecho que se desarrolle en gran medida la MST en el territorio peruano. Con lo que incluir técnicas o procedimientos es beneficioso para la operación como en la reducción de costos como se evidencio en la inclusión de arcos noruegos en minas subterráneas como expresa Bazan y Lezama (2021). Es de importancia mencionar este estudio, debido a que un nivel tecnológico no solo es beneficioso al incrementar los réditos económicos, sino también al salvaguardar vidas humanas (Khaboushan et al., (2020).

La viabilidad del caso de estudio, en términos económicos se evidencia como factible porque los indicadores de productividad como los costos de operación, el mayor registrado en 2021 fue de 20,1 \$/ton, siendo que luego de implementar la plataforma digital cambio a 19,2 \$/ton, por lo que se evidencia una reducción notable, concordando con Marimuthu et al. (2021) en aplicar tecnología digital en la MST facilita la explotación y es muy viable para la ejecución de un proyecto. De esta manera se corrobora que, pese a la oposición presentada ante la incursión de aspectos tecnológicos, como la transformación digital en el método tradicional del sector minero, esto resulta beneficioso en la productividad, porque puede incrementarla, reduce los costos y detecta fallos que pueden corregirse con base en proceso de automatización.

A su vez, las ventajas también abordan los problemas ambientales mencionados por Zapata (2020), ya que, la menor interacción de la actividad minera con el medio ambiente es un logro importante y de gran trascendencia, debido a que la visión de la humanidad al referirse a la minería es la destrucción irreparable de la naturaleza y su relación es directa con la pérdida de flora y fauna (Sarupria et al., 2019). En este marco la MST como en el caso de estudio, presenta un diagnóstico con poco o nulo impacto ambiental, porque la operación se realiza por debajo de la cobertura terrestre y no se remueve material innecesario.

En contraste con la cuarta revolución industrial como indica Schwab (2020), el Perú no demuestra que exista una fuerte relación entre el sector minero y la tecnología. Este hallazgo detecta los desafíos actuales ya que, son pocas las firmas mineras que emplean el método subterráneo que han automatizado sus procesos productivos y por ello no han incorporado maquinarias o tecnología sin asistencia humana (Afum et al., 2020 ; Ramírez et al., 2022). Pero pese al poco avance en comparación de potencias como Chile, el caso de estudio ha demostrado lo que menciona Solleiro et al., (2017) acerca que la implementación de tecnología dirigida a la transformación digital incrementa la productividad de las operaciones mineras, esta afirmación es correcta ya que, en la empresa NEXA, se encontró que todos los KPIs, como Extracción de mineral, Avances en mina y Taladros largos, incrementaron su rendimiento. Por lo tanto, la industria minera puede quitar una traba para que exista una visión de minería 4.0, mediante este caso de éxito.

Los resultados encontrados en la presente investigación denotan una realidad mencionada por la CESCO (2018), pues se afirma que la extracción de minerales al ser conservadora presenta una brecha con la tecnología. Es así que el caso de estudio exitoso demuestra que esta relación histórica puede superarse con el impulso de crecimiento de los proyectos mineros, antes las ventajas de las soluciones tecnológicas al método de explotación subterráneo. Por ello, la transformación digital es replicable en las empresas de MST y que puede divulgarse para conseguir un mayor alcance.

Hartlieb et al. (2022) mencionan que dentro de la minería tradicional es necesario utilizar tecnología avanzada para que se incorpore al proceso minero y se evidencien los beneficios que brinda. En la investigación realizada, se corrobora lo antes mencionado, ya que, dentro del campo

académico, no se encontraron registros de los resultados encontrados en el caso de estudio, por lo que en la empresa NEXA, es pionera en la utilización de plataformas digitales como POWER BI y un centro de control automatizado, lo que para el sector minero peruano es un insumo vital que puede ser replicado al ser un caso de éxito por otras firmas mineras efectúen procesos automatizados con un menor impacto ambiental.

A su vez, Linkminers (2020) resaltan que la realidad del COVID 19 ha ayudado a reducir las brechas del sector minero, y acelerado el uso de la tecnología. Esta realidad se evidencia en la investigación realizada, ya que la mayor parte de proveedores optan por la innovación tecnológica, con miras hacia que las operaciones mineras puedan efectuarse con maquinaria de última generación. En contraste con el caso de estudio la evidencia de transformación digital y automatización es evidente por lo que se concuerda con el autor.

Salomón et al. (2018) indica que la productividad es un punto clave y que se expresa como la relación entre unidades físicas con respecto a las horas de trabajo. En la presente investigación se evidencia que la productividad de la minera NEXA – Cerro Lindo, previamente obtuvo valores reducidos, pero luego de que se implementó una transformación digital, los efectos en la productividad fueron positivos. Este escenario indica la importancia que significa aumentar esta variable, ya que una gestión adecuada, integra a todas las áreas de la firma minera y así conseguir los objetivos a largo plazo. En términos generales en la MST la adopción de medidas como en el caso de estudio, representa un avance estratégico, basado en información oportuna, porque la empresa superó la brecha de la tecnología y tomó la decisión acertada, concibiendo los datos que proporcionan los registros digitales y contrarrestando con la información en línea que brindan las plataformas en línea para inteligencia empresarial.

Los resultados del caso de estudio demuestran la conclusión de Molina (2018), respecto a que la productividad de la minería peruana puede incrementarse por medio de tecnologías productivas. Es así que los datos en línea han permitido que la minera NEXA, se desarrolle y que alcance índices de efectividad más altos, principalmente porque luego de la adopción de la transformación digital el cambio notorio es el incremento de la productividad en los principales KPIs, como Extracción de mineral, Avances en mina y Taladros largos. Además, Poormirzaee et al. (2022) confirma que el aumento productivo puede lograrse por medio de la optimización,

personalización y digitalización, siendo estas técnicas las aplicadas en el caso de estudio que aplica el método subterráneo.

Ernst y Young (2018) resaltan la importancia entre los retos relacionados a los riesgos empresariales y la transformación digital. Esta afirmación es correcta ya que, en la investigación realizada se denota que la mayor parte de proveedores mineros, no contemplan aún el incorporar sistemas de información a sus productos y servicios, sino más bien han incurrido en pequeños cambios dentro de la cadena de valor. Por lo tanto, la principal desventaja de la tecnología en la MST, esta encasillada como una solución a etapas del proceso productivo y no integral. Este resultado se evidencia por lo expuesto por la CESCO (2018), debido a que toda la maquinaria presenta un nivel tecnológico destinado a la automatización, pero para maquinas específicas y no el proceso productivo. Es decir, el enfoque minero peruano está enfocado a una era digital de equipos automatizados y no en la forma de operación.

Durrant et al. (2015) indican que una dificultad identificada en las explotaciones mineras es la de compartir información. En este marco esta dificultad dentro de la empresa NEXA, se ha visto resuelta, ya que la productividad en línea es una herramienta potenciada que desde un aspecto digital se ha logrado que el flujo de información sea en tiempo real, así como informar a todo nivel de la empresa lo ocurrido durante la operación de una manera oportuna y óptima. Por lo que se a su vez, también se supera el apego al método tradicional, tal como indican Ledwaba y Mutemeri (2018).

PwC *Mining Survey* (2016) indica que la minería peruana ocupa el puesto 116 en términos de competitividad, innovación y preparación tecnológica. Esto se debe principalmente a que existe poca inversión, pero como se evidencia en este caso exitoso de estudio es posible con grandes resultados, y a futuro puede reducirse este puesto con la aplicación tecnológica y así la visión del mundo será positiva respecto a sector minero del Perú.

Conclusiones

En términos generales dentro del territorio peruano se evidenció que la aplicación tecnológica presenta un avance dentro de las empresas mineras, principalmente influenciado por los cinco proveedores más importantes, ya que estos brindan varias tecnologías, al sector minero. En este marco la minería subterránea, además de ser representativa en el país, ha notado estos avances, como, por ejemplo, el cambio de motores a Diesel por motores eléctricos, que han sido un aspecto positivo, tanto en gastos de operación como seguridad para los trabajadores. Es por ello que, pese a no existir un cambio total dentro del proceso productivo, el avance de la tecnología presenta un impacto positivo en la minería subterránea a nivel de país. En el caso de estudio la MST, dentro de la empresa NEXA, ha notado como la transformación digital ha representado un control e incremento de la producción.

Las ventajas analizadas son: 1) menor generación de escombros debido a la selectividad del método, ya que solo extrae el mineral y no restos rocosos; 2) minimización de impactos ambientales negativos, debido a la formación de túneles que por ello se remueven cantidades considerables de roca, pero no en grandes volúmenes; 3) baja contaminación de la zona de extracción, así como las áreas de influencia ya que el suelo, no necesita ser removido, 4) no utiliza explosivos en la superficie para desarrollar sus actividades diarias, 5) es directo, es por ello que las labores mineras horizontales y verticales son realizadas con tiempo previo, así como planificación enfocada en llegar desde la superficie hasta el mineral o área repleta del mismo, y 6) el ciclo de vida, ya que una mina subterránea es un método por el cual existe mayor probabilidad de una duración extendida, en lo que concierne a la explotación y a largo plazo una empresa minera puede incrementar su productividad.

Entre las principales desventajas de la MST, se diagnosticaron las siguientes: 1) compleja, debido a la existencia de diversas formas geológicas, siendo irregulares, inclinadas, estrechas o con presencia de una gran cantidad de gases, que incrementan la peligrosidad de esta explotación; 2) presencia de agua en los yacimientos que pueden debilitar las paredes al momento de la excavación para la extracción y están sujetas a grandes presiones del macizo rocoso; 3) la maquinaria introducida para este método de explotación, debido a la aceptación del sector minero y los costos que involucran, 4) los yacimientos con formas irregulares no se consideran como

productivos, y 5) la profundidad a la cual se realiza la operación, ya que los túneles tanto de boca mina o de pique, son ascensores hacia varios metros dentro del suelo.

Dentro del análisis exhaustivo se examinaron varios desafíos que enfrentan las tecnologías de minería subterránea en el Perú, siendo que los esfuerzos para su empleo se resumen en dos: comunicación y recursos. La comunicación se refiere a la sociedad minera, ya que, al no divulgar resultados relacionados con la MST, no se consigue un desarrollo sostenible. En cambio, los recursos están directamente relacionado con la inversión de los actores mineros, proveedores e instituciones públicas. Estos desafíos identificados al relacionarse con la cuarta revolución industrial se desglosan un poco más explicando que una empresa minera presenta continuidad y que al ser heredado, innovar es una transición complicada.

Además, se debe lograr un punto de equilibrio donde la introducción de nuevas tecnologías no afecte la competitividad futura y así impulsar la inversión para que en el flujo de dinero no se vean interrumpidos los márgenes de ganancia. Es así que existe un gran apego al método tradicional y que sin inversión económica una firma no adopta tecnología debido al desconocimiento del impacto positivo de este tipo de soluciones para la mina. Un aspecto importante a rescatar es que no se encontró como un desafío a la capacidad técnica, ya que los profesionales encargados de la operación están formados en la aplicación de tecnologías nuevas e innovadoras.

El impacto analizado del uso de tecnología en la minería subterránea resultó ser positivo, ya que con base en la recolección de información de la empresa NEXA – Cerro Lindo, se evidenció que emplear datos digitales en línea, influyó positivamente en los análisis de la mina, así como en incrementar la productividad. Esta conclusión se basa en el registro histórico de la compañía, que como se expuso en los resultados, presentaba niveles fluctuantes, además la tecnología empleada anteriormente estaba enfocada en registros de bases de datos tabuladas, a lo que, con la inclusión de una plataforma digital, presentó un instrumento para procesar las fuentes de datos y visualizarlos como informes y paneles. Es así que el beneficio del procesamiento de datos lleva hacia el futuro a una parte de la operación que puede extenderse a varios niveles y darle un realce significativo a la minería subterránea peruana.

Referencias bibliográficas

- Afum, B., Ben, E., & Askari, H. (2020). A mixed integer linear programming framework for optimising the extraction strategy of open pit–underground mining options and transitions. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 34(10), 700-724. <https://doi.org/10.1080/17480930.2019.1701968>
- Amoroso, D., & Orellana, M. (2019). *Diagnóstico del control subterráneo y plan de mejora en la mina de la Sociedad Minera Minervilla*. [Tesis de pregrado, Universidad del Azuay], Repositorio UAZUAY. <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/9223/1/14867.pdf>
- Apaza, G. (2020). *Estudio de causalidad de accidentes mortales por desprendimiento de rocas en la minería subterránea controlado por el organismo supervisor de la inversión en energía y minería en el Perú*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa], Repositorio UNSA. <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12773/12173/IMapvaga.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Brescia, L., Pickel, D., Gonzalez, M., Tighe, S., & Azúa, G. (2020). Accelerated construction as a new approach for underground-mining pavement: Productivity, cost and environmental study through stochastic modeling. *Journal of Cleaner Production*, 251, 119605. <https://bibliotecas.ups.edu.ec:2582/10.1016/j.jclepro.2019.119605>
- CESCO. (2018). *Impacto de las nuevas tecnologías en las competencias requeridas por la industria minera*. Recuperado el 27 de Abril de 2022, de Centro de Estudios del Cobre y la Minería: <https://bit.ly/3OkJng3>
- CESCO. (2020). *Hacia una minería 4.0: Recomendaciones para impulsar una*. Recuperado el 27 de Abril de 2022, de Centro de Estudios del Cobre y la Minería: <https://www.cesco.cl/wp-content/uploads/2020/06/Hacia-una-miner%C3%ADa-4.0.-Recomendaciones-para-impulsar-una-industria-nacional-inteligente-1-2.pdf>
- Céspedes, N. (2016). *Productividad en el Perú: medición, determinantes e implicaciones* (1ra ed.). Universidad del Pacífico. <https://repositorio.up.edu.pe/bitstream/handle/11354/1083/C%c3%a9spedesNikita2016.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

- Chung, J., Asad, M., & Topal, E. (2022). Timing of transition from open-pit to underground mining: A simultaneous optimisation model for open-pit and underground mine production schedules. *Resources Policy*, 77, 102632.
<https://bibliotecas.ups.edu.ec:2582/10.1016/j.resourpol.2022.102632>
- Energía JCYL. (2021). *Minería Subterránea*. Obtenido de Energía y minería en Castilla León:
<https://energia.jcyl.es/web/es/biblioteca/mineria-subterranea.html>
- Espinosa, N., & Hormaechea, R. (2021). *Optimización de los procesos de perforación y voladura en los frentes de trabajo de la sociedad minera “Santa Clara”, Ponce Enríquez-Azuay*. [Tesis de pregrado, Universidad del Azuay], Repositorio UAZUAY.
<https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/11525/1/17057.pdf>
- Hartlieb, P., Hecken, R., Kowitz, S., Suciú, M., & Ziegler, M. (2022). *Sustainable Smart Mining: Safe, Economical, Environmental Friendly* (1ST ed.). Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-84315-1_4
- Horinson, G. (2012). *Gestión de productividad total en empresas de minería subterránea*. Obtenido de Gestio polis: <https://www.gestiopolis.com/gestión-de-productividad-total-minería-subterránea>.
- IIMP. (2020). *Memoria Institucional 2020*. Recuperado el 28 de Abril de 2022, de Instituto de Ingenieros de Minas del Perú:
<https://iimp.org.pe/publicaciones?mselkid=bb41a692c6f411ec83ba8f16f72be02a>
- Kalisz, S., Kibort, K., Mioduska, J., Lieder, M., & Małachowska, A. (2022). Waste management in the mining industry of metals ores, coal, oil and natural gas-A review. *Journal of environmental management*, 304, 114239.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114239>
- Khaboushan, A., Osanloo, M., & Esfahanipour, A. (2020). Optimization of open pit to underground transition depth: An idea for reducing waste rock contamination while maximizing economic benefits. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123530.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123530>
- Ledwaba, P., & Mutemeri, N. (2018). Institutional gaps and challenges in artisanal and small-scale mining in South Africa. *Resources Policy*, 56, 141-148.
<https://bibliotecas.ups.edu.ec:2582/10.1016/j.resourpol.2017.11.010>

- Linkminers. (2020). *Soluciones tecnológicas para enfrentar al Covid-19 en la minería peruana*. Recuperado el 27 de Abril de 2022, de Link miners:
<https://drive.google.com/file/d/16y4XSQIUOnFwjtdUJDDqDwc3lcnQdsb4/view>
- Marimuthu, R., Sankaranarayanan, B., Ali, S., de Sousa, A., & Karuppiah, K. (2021). Assessment of key socio-economic and environmental challenges in the mining industry: Implications for resource policies in emerging economies. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 814-830. <https://bibliotecas.ups.edu.ec:2582/10.1016/j.spc.2021.02.005>
- MINEM. (1 de Junio de 2021). *Anuario Minero 2020*. Obtenido de Ministerio de Energía y Minas: <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/1944416-anuario-minero-2020>
- Ministerio de Minería Chile. (2020). *Indicadores de Productividad de la minería del cobre en Chile al 2019*. Recuperado el 10 de Junio de 2022, de Comisión Chilena del Cobre: <https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/2020%2012%2030%20Indicadores%20de%20productividad%202020%20VF.pdf>
- Molina, O. (2018). Innovation in an unfavorable context: Local mining suppliers in Peru. *Resources Policy*, 58(1), 34-48. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.10.011>
- Pietrobelli, C., Marin, A., & Olivari, J. (2018). Innovation in mining value chains: New evidence from Latin America. *Resources Policy*, 58(1), 1-10.
<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.05.010>
- Poormirzaee, R., Hosseini, S., & Taghizadeh, R. (2022). Smart mining policy: Integrating fuzzy-VIKOR technique and the Z-number concept to implement industry 4.0 strategies in mining engineering. *Resources Policy*, 77, 102768.
<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102768>
- Ramírez, C., Alegría, H., & Muñoz, F. (2022). Modelo de análisis de riesgos de contratos en minería ante Industria 4.0. *Journal of Management & Business Studies*, 4(1), 1-16.
<https://doi.org/10.32457/jmabs.v4i1.1689>
- Robles, R., & Foladori, G. (2019). Una revisión histórica de la automatización de la minería en México. *Problemas del desarrollo*, 50(197), 157-180.
<https://doi.org/10.22201/iiec.20078951e.2019.197.64750>
- Rodríguez, ., Y., Pérez, E., & Barrantes, W. (2019). Evaluación de la exposición a factores de riesgo de desórdenes musculoesqueléticos de tareas de minería subterránea. *Scientia et*

- technica*, 24(2), 256-263.
<https://www.redalyc.org/journal/849/84961237012/84961237012.pdf>
- Rumbo Minero Internacional. (2015). *Minería subterránea: apostando por la innovación y tecnologías*. Revista Rumbo Minero Internacional:
<https://www.rumbominero.com/revista/informes/mineria-subterranea-apostando-por-la-innovacion-y-tecnologias/>
- Sarupria, M., Manjare, S., & Girap, M. (2019). Environmental impact assessment studies for mining area in Goa, India, using the new approach. *Environmental monitoring and assessment*, 191(1), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-7135-z>
- Schwab, K. (2020). La Cuarta Revolución Industrial. *Futuro Hoy*, 1(1), 06-10.
<https://doi.org/10.52749/fh.v1i1.1>
- Sishi, M., & Telukdarie, A. (2020). Implementation of Industry 4.0 technologies in the mining industry – a case study. *Int. J. Mining and Mineral Engineering*, 11(1), 1–22.
<https://doi.org/10.1109/IEEM.2017.8289880>
- Sishi, M., & Telukdarie, A. (2020). Implementation of Industry 4.0 technologies in the mining industry-a case study. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 11(1), 1-22. <https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJMME.2020.105852>
- Solleiro, J., Castañón, R., Mejía, O., & Figueroa, B. (2017). *Human capital for innovation in Mexico's mining industry I*. ISPIM Conference Proceedings.
https://www.researchgate.net/profile/Jose-Solleiro/publication/320234806_Human_capital_for_innovation_in_Mexico's_mining_industry/links/59d654560f7e9b42a6a9fba0/Human-capital-for-innovation-in-Mexicos-mining-industry.pdf
- Vera, E. (2017). La innovación como base del relacionamiento con proveedores. *Revista Kawsaypacha: sociedad y medio ambiente*, 1(1), 11-48.
<https://doi.org/10.18800/kawsaypacha.2017.01.001>
- Waterhouse, P. Cooper [PWC]. (2016). *PWC Mining Survey 2016-Perceptions on risks and opportunities of investing in Peru's mining sector*. Obtenido de PWC.
- Zapata, G. (2020). Problemas medioambientales de la minería aurífera ilegal en Madre de Dios (Perú). *Observatorio Medioambiental*, 23, 229-241.
<http://dx.doi.org/10.5209/OBMD.73177>