



# Revista **INAS**

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica

FIGMM ACREDITADA POR:



Engineering  
Accreditation  
Commission



Imagen  
renovada

Dr. Ing. Santiago  
Valverde E.  
**DECANO**



Convenio con  
Koica (Corea)



Alfonso  
López Chau  
**RECTOR**



Laboratorio  
Mecánica Rocas  
ISO 9001-2015

**EDICIÓN RELANZAMIENTO**

# Contenido

Editorial	4	Ing. Roque Benavides celebró cena de confraternidad	10
Índice	5		
Pronunciamiento	6	Profesionales se graduaron de la Maestría en Gestión Minera 2021-II	12
		<i>Posgrado</i>	
Universidad Nacional de Ingeniería celebró 146 años al servicio del Perú	8	Nueve alumnos de nuestra facultad son los ganadores de la beca Jesús Arias Dávila	13
UNI homenajeó a miembros destacados de la comunidad universitaria	10	Promoción de Ingenieros de Minas 2022-1 organizó el V SITTMIN	16
UNI y CIP-CD Lima firmaron un convenio	11		
<i>Institucional</i>		<i>Pregrado</i>	

Congreso Nacional de Minería se llevará a cabo en la Universidad Nacional de Trujillo

20

Quellaveco procesará la totalidad de sus relaves para recuperar cobre

21

Mina Cobriza fue adquirida por un valor de US\$19.7 millones por el grupo Dyer

23

*Actualidad minera*

Aspectos educativos en el contexto de la minería sostenible

25

*Columna del egresado*

Gases de efecto invernadero generados por la extracción de oro. El ejemplo de la Mina Apumayo, Perú

31

Mejoramiento del sistema de ventilación deminas para suministrar aire limpio a las labores subterráneas

44

Simulación y Optimización de Planes Mineros

53

*Artículos técnicos*

# EDITORIAL

**D**urante los días que se desarrolle PERUMIN la atención minera y económica se concentrará en Arequipa. En efecto, la Convención Minera es el acontecimiento de mayor trascendencia del sector minero peruano. Según sus organizadores, esta edición prevé la visita de más de 50 mil profesionales e inversionistas mineros de más de diversos países, los cuales generarán un impacto económico importante para la ciudad blanca.

Sin embargo, el actual contexto no se puede obviar. El actual gobierno aún no da señales de apoyo real al sector.

Por el contrario, en los últimos meses fuimos testigos de una preocupante desidia ante los constantes bloqueos a las operaciones de Las Bambas, los conflictos alrededor de Cuajone, los desmanes violentos en Apumayo, Cobriza, por mencionar solo algunos casos.

Se espera pues que PERUMIN sea la vitrina para que el sector se pronuncie

sobre lo sucedido, plantee soluciones y estreche puentes con aquellos que aún no entienden, o no quieren entender los beneficios de la minería.

Creemos que estamos ante un evento bisagra, que puede ser una oportunidad para que la minería pueda reafirmarse como motor de desarrollo y crecimiento sostenido, presentando de forma más concreta sus potencialidades y ventajas a esos sectores a los que aún no convence.

Cada vez más gente conoce y reconoce como la minería genera nuevos puestos de trabajo, fomenta las compras de insumos, bienes y servicios a la industria nacional, generando así cadenas productivas a nivel regional y nacional, y dota al Estado de mayores recursos gracias a los niveles de producción y exportación que genera.

Este cambio de pensamiento a nivel general será un proceso que tomará años, que significará mucho esfuerzo, pero que vale la pena, sin duda. Es el momento de reafirmarse en ello.



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica

## **Decano**

Dr. Ing. Santiago G. Valverde  
Espinoza

## **Directores de Escuela**

*Ingeniería Geológica*  
M. Sc. Ing. Nora Nelly Revollé  
Alvarez  
*Ingeniería de Minas*  
M. Sc. Ing. José Antonio  
Corimanya Mauricio  
*Ingeniería Metalúrgica*  
Dra. Ing. Mery Cecilia Gómez  
Marroquín

## **Revista Minas**

### **Director**

Dr. Ing. Santiago G. Valverde  
Espinoza

## **Editor General**

M. Sc. Ing. Efraín Eugenio Castillo Alejos

## **Comité Consultivo**

Ing. Roque Benavides Ganoza  
Dr. Ing. Alberto Landauro Abanto  
Dr. Ing. Jimmy Aurelio Rosales Huamaní  
M. Sc. Ing. Manuel Natividad Cruz Torres  
M. Sc. Ing. Jorge Gerardo Ayala Mina

## **Editor Periodístico**

Omar Alvarez More

## **Diseño y Diagramación**

Daniela Lucianne Sisniegas López

## **Colaboradora**

Rosa Paula Olivares Mamani

**REVISTA MINAS** es el órgano oficial  
de la Facultad de Ingeniería Geológica,  
Minera y Metalúrgica

Av. Túpac Amaru 210 Rímac.

Telf.: 481-1070 Anexo 4042

Directo: 482-8533

E-mail: decano\_figmm@uni.edu.pe



# PRONUNCIAMIENTO



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**  
**Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica**

## **El decano, las autoridades, profesores y comunidad de la FIGMM UNI.**

El principal argumento contra la actividad minera es, sin lugar a dudas, de índole medioambiental. Todos sus críticos afirman alegremente que no respeta al medioambiente ni sus normas, a pesar de ser la industria más fiscalizada. Para desinformar se valen de cualquier argucia, como, por ejemplo, achacar a las actuales empresas mineras pasivos ambientales del pasado, sin explicar antes el contexto de esas acciones, en donde no existían ni las tecnologías ni las normas que se cumplen hoy.

Desde los últimos tiempos, se intenta, no sabemos con qué ánimo, contraponerla a otra actividad importante y legendaria de nuestro país como es la agricultura. No obstante, los hechos demuestran que el agro es más competitivo con equipos, fertilizantes y carreteras hechos con metales y minerales que estas personas desprecian. Estudios académicos, asimismo, prueban que la actividad que más consume y más pierde agua no es la minería, sino la agricultura, sin embargo, el mito dice que donde hay minería no hay agua.

Nos llama la atención que aquellos convenientes activistas ambientales no tengan el mismo entusiasmo fiscalizador con el problema de la minería ilegal en el país, el mismo que sí tienen solo con las grandes compañías mineras. Acaso su indignación no se fomenta al presenciar la contaminación en parques naturales (como en el caso de Madre de Dios), a causa de la invasión de pequeños mineros que nadie controla y que nadie desaloja. ¿Eso no es importante, o no da prensa ni créditos?

Del mismo modo, a aquellos que sostienen que la minería puede ser reemplazada por cualquier actividad, habría que recordarles que los impuestos y regalías que alimentan los presupuestos del Estado, sin los cuales tantos programas sociales serían imposibles, provienen de las rentas mineras.

Nuestra economía requiere una minería que pueda desarrollarse con la confianza y el respaldo de un Estado, a través de sus distintas dependencias medioambientales. Sin embargo, el Estado necesita modernizarse para ser el impulsor de futuras inversiones mineras. Como es lógico, este deseo no implica una carta libre sin los controles necesarios que aseguren el respeto tanto por el medioambiente como para las comunidades. En efecto, en esa aparente contradicción descansa el principal reto: encontrar el equilibrio entre decidido promotor minero y férreo y justo vigilante del equilibrio medioambiental.

Las empresas por su parte deberían trabajar en planeamientos adecuados para su inversión. Es decir, desarrollar una metodología ordenada para llevar a cabo un proyecto, que merme las tensiones con el Estado al momento de afrontar los problemas externos que todos conocemos.

La minería significa tanto para nuestro país (divisas, empleos e impuestos). Debemos hacer de todo por su desarrollo, pues es la base sobre la cual se puede diversificar el país de manera sana y generar más oportunidades para la población.

**Dr. Ing. Santiago Valverde Espinoza**

Decano de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica

Lima, Septiembre de 2022



## ESCUELA DE POSGRADO OFRECE SEIS MAESTRÍAS DE PRIMER NIVEL ACORDES CON LOS DESAFÍOS DE UNA INDUSTRIA MODERNA Y SOSTENIBLE



**Dr. Alberto Landauro Abanto, director de la Escuela de Posgrado FIGMM UNI. Destacado egresado de nuestra facultad. Es profesor principal y ha sido decano**

Desde su creación, la Escuela de Posgrado en la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica de la Universidad Nacional de Ingeniería ha estado orientada por la prioridad que tiene la formación de investigadores para el desarrollo científico y tecnológico.

Además, está enmarcada en la formación de profesionales de primer nivel que desarrollen una minería moderna y sostenible, que desarrolle los recursos minerales del país, de manera que maximicen los beneficios económicos y sociales, al tiempo que minimizan los impactos ambientales.

Por tal motivo, el Dr. Alberto Landauro Abanto, director de la Escuela de Posgrado FIGMM UNI, informó que la institución amplió su oferta académica para satisfacer necesidades específicas que exigen los nuevos tiempos a la industria minera. “Ofrecemos las maestrías en Gestión Minera; Minería y Medio Ambiente; Seguridad y Salud Minera; Ingeniería de Minas; Ingeniería Metalúrgica e Ingeniería Geológica”, detalló.

Landauro también informó que actualmente están actualizando los contenidos de los sílabos de las seis maestrías, respetando el reglamento de posgrado de la Universidad.



**Dr. Landauro es reconocido por un estudiante de la Maestría de Gestión Minera**

Del mismo modo, indicó que la calidad educativa está garantizada con un staff de profesores de primer nivel, actualizados acorde a las nuevas tecnologías.

“Hemos potenciado nuestro staff con exitosos empresarios del sector. Un ejemplo de ello, es el ingeniero Roque Benavides Ganoza, quien es docente de nuestra escuela. Creemos que con su comprobada experiencia puede ofrecer no solo contenidos teóricos a nuestros alumnos, sino prácticos y vivenciales”, explicó Landauro, quien recordó que el padre del ingeniero Benavides, don Alberto Benavides de la Quintana, fue un ilustre egresado y miembro querido de nuestra comunidad.

Agregó que el ingeniero Benavides dicta en la maestría de Gestión Minera, lo que la hace una de los programas más prestigiosos del país.

En otro momento, señaló que el 90% de los estudiantes de posgrado trabajan en las

principales compañías mineras del país. También cuentan con profesionales que laboran en el Estado y docentes de otras universidades. “Esto permite que ellos elaboren tesis aplicadas a las realidades de las unidades mineras donde trabajan. Esas investigaciones no solo benefician a la Academia, sino a la empresa en general”, explicó.

Para concluir, Landauro sostuvo que ya cuentan con una resolución rectoral UNI para el inicio del doctorado, y que el tema está en este momento en manos de Sunedu.



**La Escuela de Posgrado ofrece las maestrías en Gestión Minera; Minería y Medio Ambiente; Seguridad y Salud Minera; Ingeniería de Minas; Ingeniería Metalúrgica e Ingeniería Geológica.**



## EL LABORATORIO DE ESPECTROMETRÍA MÁS QUE ANÁLISIS HACE ESTUDIO E INVESTIGACIÓN



El Laboratorio de Espectrometría permite evaluaciones, investigaciones y proyectos geoquímicos y está acreditado por ABET.

La espectrometría es una técnica analítica que se utiliza en el ensayo cualitativo y cuantitativo de una sustancia química. En otras palabras, puede usarse en la evaluación espectroscópica de una sustancia de muestra, es decir, para investigar el espectro de composición de esa muestra en particular. En pocas palabras, informa sobre los componentes reales presentes en una muestra de prueba y también sobre la concentración de cada uno de los componentes.

Esta importante técnica es de vital importancia para la minería, y permite

evaluaciones, investigaciones y proyectos geoquímicos. Por ello nuestra facultad cuenta con un Laboratorio de Espectrometría, acreditado por ABET y se encuentra en proceso de certificación ISO y OHSAS.



El ingeniero Atilio Mendoza Apolaya, jefe del Laboratorio de Espectrometría, explicó que el laboratorio está al servicio a todos los estudiantes de la facultad, y ofrece servicios a terceros.

Dicho laboratorio ofrece un soporte experimental a estudiantes de pregrado en los cursos de Geoquímica y Análisis Espectral de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica. Además, para los estudiantes de posgrado ofrece apoyo en sus líneas de investigación en el aspecto medioambiental. Asimismo, ofrece sus servicios a terceros, compañías mineras y exploradoras.

Está equipado de un espectrógrafo de emisión óptica, un difractorómetro de rayos X, dos absorciones atómicas, un espectrofotómetro ultravioleta visible y un separador magnético, entre otros equipos.

El ingeniero Atilio Mendoza Apolaya, jefe del Laboratorio de Espectrometría, explicó que trabajan identificando elementos de importancia económica para la minería. “Realizamos análisis espectrales multielementales, que permiten identificar elementos de interés económico y aquellos que puedan resultar un problema (el arsénico, por ejemplo). El espectro nos ofrece

información que de otra manera no podemos observar. Ahí radica su importancia”, explicó.

“El Laboratorio de Espectrometría más que análisis hace estudio e investigación. Eso nos diferencia de los demás. Recibimos una muestra, recabamos información geológica, minera y metalúrgica, además de hacer pruebas. Ofrecemos un trabajo más integral”, manifestó.

En la actualidad, se encuentra desarrollando proyectos de investigación en temas como geoquímica del oro, y en desarrollo de litio. Otros proyectos son: Exploración geoquímica por oro en ambientes volcánicos; Exploración geoquímica por oro en el espectro “Alejandro Coronel Dos”; Exploración geoquímica por oro en el espectro “Zorro Dorado”; Exploración geoquímica por cobre en Cerro Grande; Exploración geoquímica por oro en Patate; Exploración geoquímica por metales bases; Exploración de metales del grupo del platino en ambientes magnéticos y placeres aluviales, entre otros.



Alumnos de la facultad realizan prácticas profesionales.



# UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA CELEBRÓ 146 AÑOS AL SERVICIO DEL PERÚ



Ceremonia central se realizó el 22 de julio y contó con la participación de autoridades de toda la universidad.

La Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) cumplió 146 años al servicio del país, por ello, durante dos semanas llevó a cabo una serie de actividades conmemorativas, académicas y culturales, presididas por el rector de nuestra casa de estudios, Dr. Alfonso López Chau Nava.

La Ceremonia Central de Aniversario se realizó el 22 de julio e inició con un minuto de silencio por el sensible fallecimiento de los miembros de nuestra comunidad universitaria que partieron durante este último año.

El evento continuó con la presentación

del video institucional por el 146° aniversario de la UNI, seguido por la lectura del Discurso Inaugural de Eduardo de Habich (1876) y de la Ley de transformación de Escuela de Ingenieros a Universidad Nacional de Ingeniería (1955).

Como uno de los oradores, nuestro decano, Dr. Santiago Valverde Espinoza, ofreció unas palabras conmemorativas por el aniversario de fundación.

Los actos conmemorativos en el día central iniciaron con el izamiento de las banderas del Perú y de la UNI. Acto seguido, se



La UNI fue fundada en 1876 por el ingeniero polaco Eduardo de Habich, con la denominación de Escuela Especial de Construcciones Civiles y de Minas del Perú.

realizó la colocación de ofrendas florales a los bustos del presidente Manuel Pardo y Lavalle, así como al Ingeniero Eduardo de Habich, ceremonia protocolar que contó con la presencia del rector, vicerrectores, decanos, entre otras autoridades.

El martes 12 de julio se realizó la colocación de ofrendas florales en los mausoleos del Presidente Manuel Pardo y Lavalle, Ing. Eduardo de Habich, e Ing. Ernest Malinowski, personajes ilustres de la UNI, ubicados en el Cementerio Presbítero Maestro.



Ofrendas florales en los mausoleos del Presidente Manuel Pardo y Lavalle, Ing. Eduardo de Habich, e Ing. Ernest Malinowski, ubicados en el Cementerio Presbítero Maestro.

Seguidamente, se llevó a cabo el Paseo de la Bandera, que empezó en la Biblioteca Central y culminó en la plazuela interna del Pabellón Central, justamente para dar inicio al Desfile Cívico en conmemoración a las Fiestas Patrias y nuestro 146° Aniversario.

Se hizo lo propio en el parque Polonia (Jesús María), donde se encuentran los monumentos de los ingenieros polacos que aportaron significativamente en la historia de la UNI y el Perú.



Tradicional paseo de la Bandera empezó en la Biblioteca Central y culminó en la plazuela interna del Pabellón Central. Contó con la participación activa de nuestro decano, Dr. Ing. Santiago Valverde Espinoza.



## UNI HOMENAJEÓ A MIEMBROS DESTACADOS DE LA COMUNIDAD UNIVERSITARIA



Destacados docentes, estudiantes y trabajadores fueron reconocidos por el Rector de la UNI.

En el marco de las celebraciones por nuestro 146° Aniversario de creación institucional, la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) llevó a cabo una ceremonia de reconocimiento a la comunidad universitaria quien esta conformada por sus destacados estudiantes, docentes y trabajadores.

El evento se realizó en el Gran Teatro de la UNI y fue presidido por el rector de la UNI, Dr. Alfonso López Chau Nava, quien expresó palabras de felicitación a los homenajeados y les agradeció por el esfuerzo de seguir comprometidos con la mejora continua de la institución.

También estuvieron presentes en la ceremonia la vicerrectora Académica, Dra. Shirley Chilet Cama; el vicerrector de Investigación, Dr. Arturo Talledo

Coronado; entre otras autoridades.



Rosa Paula Olivares Mamani, secretaria del decanato, fue homenajead por su destacado profesionalismo.

En la mencionada actividad se reconoció a los trabajadores destacados. Por nuestra facultad, se rindió homenaje a la señora Rosa Paula Olivares Mamani, secretaria del decanato, por su destacado profesionalismo, compromiso y servicio a la FIGMM UNI.

El evento culminó con la presentación artística del vals "Amarraditos" y el tondero "El Palomo Enamorado", a cargo del Centro Cultural Folklórico de la UNI – Folkuni.



El rector de la UNI, Dr. Alfonso López Chau Nava y el decano del CIP CD Lima, Ing. Roque Benavides Ganoza firmaron el acuerdo.

## UNI Y CIP-CD LIMA FIRMARON UN CONVENIO MARCO DE COOPERACIÓN INTERINSTITUCIONAL

Con el objetivo de establecer y desarrollar mecanismos e instrumentos de mutua colaboración y beneficio, así como la cooperación técnica y prestación de servicios entre ambas instituciones, la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) y el Colegio de Ingenieros del Perú – Consejo Departamental de Lima, firmaron un convenio marco el martes 12 de julio.

La firma del acuerdo estuvo a cargo del rector de la UNI, Dr. Alfonso López Chau Nava, y el decano del CIP-CD Lima, Ing. Roque Benavides Ganoza. También estuvieron presentes la vicerrectora Académica, Dra. Shirley Chilet Cama, y el vicerrector de Investigación, Dr. Arturo Talledo Coronado; entre otros directivos. En dicho evento el rector de la UNI, Dr. López Chau, expresó que este acuerdo traerá buenos resultados entre ambas instituciones.

"Creo que este es un convenio histórico entre uno de los gremios más poderosos del país y la UNI. Estoy seguro que después de este convenio marco pasaremos a convenios específicos. Ya hemos conversado muchísimo con el decano para llegar al tema del hidrógeno verde, que es una de las grandes propuestas de nuestra universidad".

Por su parte, el decano del CIP-CD Lima, Ing. Benavides, manifestó su satisfacción de haber firmado este convenio. "Una universidad como la UNI, que inicialmente fue la Escuela Nacional de Ingenieros, es un hecho histórico, cuyo fundador fue nada menos que el primer presidente civil de nuestro país, Manuel Pardo y Lavalle. Creo que es fundamental que los colegas de los colegios profesionales, los gremios empresariales y la sociedad civil en su conjunto trabajemos con la academia.



# **ING. ROQUE BENAVIDES CELEBRÓ CENA DE CONFRATERNIDAD CON SUS ALUMNOS DE LA MAESTRÍA DE GESTIÓN MINERA**



El Ing. Roque Benavides Ganoza, catedrático de la Maestría de Gestión Minera de la Escuela de Posgrado FIGMM UNI, recibió un presente de parte de sus alumnos.

Con el objetivo de afianzar lazos y de conocer a los alumnos que no pudo conocer durante la pandemia, el Ing. Roque Benavides Ganoza, catedrático de la Maestría de Gestión Minera 2020 de la Universidad Nacional de Ingeniería-UNI, realizó una cena de confraternidad con sus alumnos del curso de Estrategia Gerencial Ciclo 2022-1.

La reunión se engalanó, asimismo, con la presencia del rector de la UNI, Dr. Alfonso López Chau, y del decano de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica-FIGMM UNI, Dr. Santiago Valverde Espinoza.

Durante la cita, el Ing. Benavides resaltó

la importancia de la relación Universidad-Empresa e indicó que ambas deben estar estrechamente ligadas, no solo en el campo de la gestión del talento sino en el de la investigación e innovación.

Buscando reafirmar este vínculo, durante su curso sus estudiantes recibieron la visita de CEOs y de directivos de las principales compañías mineras. Entre ellos destacan, Víctor Gobitz, CEO de Antamina; Edgardo Orderique, CEO de Minera Las Bambas; Derek Jon Cooke, gerente general de Sociedad Minera Cerro Verde; Julia Torreblanca, vicepresidenta de Asuntos Corporativos de la misma compañía; y Alejandro Hermoza, vicepresidente de Sostenibilidad de



Dr. Santiago Valverde Espinoza, decano de la FIGMM UNI, saludó la reunión propiciada por el ingeniero Benavides, y destacó que ya se viene convirtiendo en un tradicional evento.

Compañía de Minas Buenaventura.

A su turno, el Dr. Alfonso López Chau saludó el enfoque de este curso, e instó a los demás profesores a copiar este ejemplo. En otro momento, recordó a la figura del Ing. Alberto Benavides de la Quintana, egresado ilustre de la UNI, fundador y presidente del Patronato de la UNI (1997-2014); Doctor Honoris Causa por nuestra casa de estudios (1995), y Antorcha de Habich (2005).

Para concluir, el Dr. Santiago Valverde agradeció el compromiso del Ing. Benavides con la educación de calidad, y remarcó que las Maestrías de la Escuela de Posgrado de la FIGMM UNI son de calidad internacional y cuentan con catedráticos de primer nivel.



Ing. Roque Benavides Ganoza, presidente del Directorio de Compañía de Minas Buenaventura; Dr. Alfonso López Chau, rector de la UNI; Dr. Ing. Santiago Valverde Espinoza, decano FIGMM UNI.



## PROFESIONALES SE GRADUARON DE LA MAESTRÍA EN GESTIÓN MINERA 2021-II

En una emotiva ceremonia realizada el 1 de julio, se llevó a cabo la ceremonia de graduación de la promoción 2021-II "MBA. Fernando Eli Valdez Nolasco" de la Maestría en Gestión Minera de nuestra Escuela de Posgrado. El evento contó con la participación del decano de la FIGMM UNI, Dr. Santiago Valverde Espinoza; del director de la Unidad de Posgrado, Dr. Alberto Landauro Abanto, y del padrino de la promoción, Ing. Fernando Valdez.



Dr. Santiago Valverde Espinoza, decano de la FIGMM UNI, saludó la reunión propiciada por el ingeniero Benavides, y destacó que ya se viene convirtiendo en un tradicional evento.

A su turno, el Dr. Santiago Valverde remarcó que la formación y exigencia que recibieron en nuestras aulas les otorgará las herramientas necesarias para resolver y ofrecer soluciones en la industria minera. Por su parte, el representante de la promoción, Ing. Manuel Muñoz agradeció a las autoridades por su apoyo, y remarcó la calidad de la enseñanza que recibió junto a sus compañeros.



Dr. Ing. Alberto Landauro Abanto, director de la Escuela de Posgrado FIGMM UNI; Dr. Ing. Santiago Valverde Espinoza, decano FIGMM UNI; MBA. Ing. Fernando Valdez Nolasco, padrino de la Promoción.

### Graduados

Ing. Callalli Villafuerte, David Alejandro  
Ing. Muñoz Bernardo, Manuel Marcial  
Ing. Capcha Milla, Wildber Idan  
Ing. Salinas Rivera, Jordan Steve  
Ing. Castro Muñoz, José Justiniano  
Ing. Santos Roque, Julio César  
Ing. Gamero Beltran, Leonidas Angel  
Ing. Tello Rupay, Edwin  
Ing. Huaroc Rojas, Luis Miguel  
Ing. Torre Huaman, Fredy Manuel

## NUEVE ALUMNOS DE NUESTRA FACULTAD SON LOS GANADORES DE LA BECA JESÚS ARIAS DÁVILA DE COMPAÑÍA MINERA PODEROSA



Renato Pérez Guía (Escuela Profesional Ing. Minas), Dr. Ing. Santiago Valverde Espinoza, decano FIGMM UNI; Luis Nelson Ali Cuadros (Escuela Profesional Ing. Metalúrgica); Sebastián Emilio Montoya Mendoza (Escuela Profesional Ing. Minas).

En reconocimiento a su excelente desempeño académico, nueve alumnos del séptimo ciclo de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica-FIGMM UNI recibieron la beca "Jesús Arias Dávila".

Como se sabe, Compañía Minera Poderosa estableció mediante un convenio con el Patronato de la Universidad Nacional de Ingeniería, la beca en homenaje a la memoria de su fundador, esto para contribuir a solventar los gastos de los últimos ciclos de la carrera de estudiantes universitarios.

Los ganadores por la Escuela Profesional

de Ingeniería Geológica fueron: Franco Vincenzo Portella Nina, Bregette Claudia Falcon Valdivia y Sharmely Paliza Candia.

Por la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica fueron Luis Nelson Ali Cuadros Arana, David Jonathan Manrique Contreras y Mark Ronald Astecker Tafur. Por la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas los ganadores fueron: Renato Paolo Steven Pérez Guía, Jhon Alain Mayhua Quispe, y Sebastian Emilio Montoya Mendoza.

La coordinación para la pre-selección y selección de los alumnos fue realizada por la Oficina de Proyección Social FIGMM UNI,



liderada por la Mg. Ing. Lily Edith Ponce Gagó. La beca integral consiste en asignar el equivalente a S/20,000 anuales, otorgados a través de ProUNI, por concepto de asignación mensual durante el año académico (abril – diciembre), para cubrir las necesidades básicas de alimentación, transporte, vestido, y por concepto de cursos de inglés intensivo, seminarios o congresos de especialización

de la carrera. Adicionalmente, otro de los beneficios otorgados es la realización de prácticas pre profesionales remuneradas en PODEROSA durante la vigencia de la beca. Este programa de becas inició el 25 de marzo del año 2013.

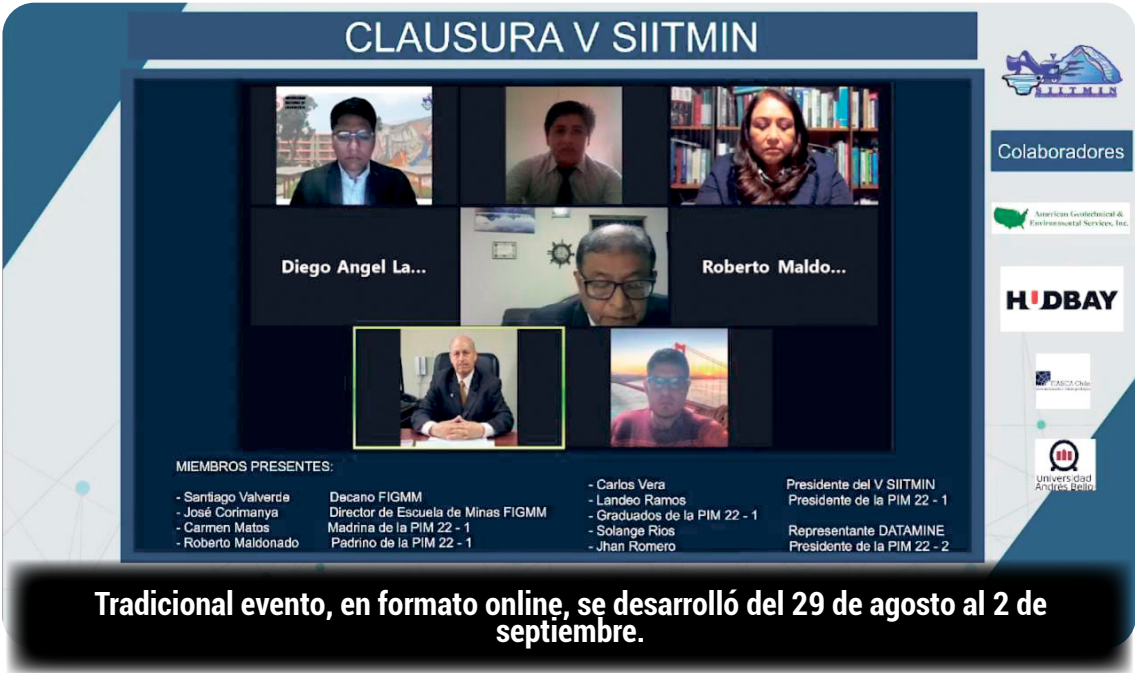
CIA. MINERA PODEROSA ALUMNOS SELECCIONADOS BECA JAD 2022-1

GEOLOGIA		
N	CODIGO	APELLIDOS Y NOMBRES
1	20190253G	PORTELLA-NINA-FRANCO VINCENZO
2	20194110F	FALCON-VALDIVIA-BREGETTE CLAUDIA
3	20190434A	PALIZA-CANDIA-SHARMELY

METALURGIA		
N	CODIGO	APELLIDOS Y NOMBRES
1	20194045J	CUADROS-ARANA-LUIS NELSON ALI
2	20190458H	MANRIQUE-CONTRERAS-DAVID JONATHAN
3	20190217K	ASTECKER-TAFUR-MARK RONALD

MINAS		
N	CODIGO	APELLIDOS Y NOMBRES
1	20190212I	PEREZ-GUIA-RENATO PAOLO STEVEEN
2	20192033D	MAYHUA-QUISPE-JHON ALAIN
3	20190190E	MONTOYA-MENDOZA-SEBASTIAN EMILIO

PROMOCIÓN DE INGENIEROS DE MINAS 2022-1 ORGANIZÓ EL V SIITMIN



La Promoción de Ingenieros de Minas 2022-1 "M. Sc. Eng. Ing. Carmen Rosalia Matos Avalos" de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) organizó el V **Simposium Internacional de Innovaciones Tecnológicas Mineras (SIITMIN)**, del 29 de agosto al 2 de septiembre en la modalidad virtual. El tradicional evento tiene como objetivo dar a conocer los últimos avances tecnológicos de la industria minera nacional e internacional desde un punto de vista técnico, económico y ecológico.

Del mismo modo, busca ofrecer un evento educativo, innovador y de alta calidad, con objetivo de mejorar sus conocimientos profesionales y generar un valor agregado en la minería peruana.El V SIITMIN, dirigido a estudiantes, técnicos y profesionales del sector minero, tuvo la participación

de especialistas nacionales y de distintos países como EE.UU., Canadá, Chile, Bolivia. Asimismo, con representantes de compañías como Antamina, BHP, Nexa Resources, Orica, Datamine, AESA, SRK Consulting, Waiime Perú, entre otros.

La ceremonia de clausura contó con la presencia del Dr. Ing. Santiago Valverde Espinoza, decano FIGMM UNI; Mg. Ing. José Corimanya, director de Escuela de Minas FIGMM UNI; Mg. Sc. Eng. Ing. Carmen Matos, Madrina de la PIM 22-1; Ing. Roberto Maldonado, Padrino de la PIM 22-1; y Solange Ríos, representante de Datamine.

Los alumnos fueron representados por Carlos Vera, presidente del V SIITMIN; Landeo Ramos, presidente de la PIM 22-1 y Jhan Romero, presidente de la PIM 22-1.



## EGRESADO DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA OBTUVO LA BECA ERASMUS MUNDUS DE LA UNIÓN EUROPEA



Javier Escalante Villanueva ya está realizando su primer semestre en la Universidad de Lieja (Bélgica).

Javier Andrés Escalante Villanueva, egresado de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica (código 2014), resultó ganador de la Beca Erasmus Mundus, promovida por la Unión Europea, a través de la Comisión Europea, con la finalidad de impulsar la educación, la formación profesional y el deporte en Europa a través de los países miembro que, mediante sus respectivas universidades, participan en este programa.

Escalante obtuvo específicamente la beca EMerald Master Course in Resources Engineering, y, actualmente, está realizando su primer semestre en la Universidad de Lieja (Bélgica). Esta beca es para estudiantes egresados de licenciatura interesados en cursar una maestría en al menos dos países del programa Erasmus+. Está direccionada para profesionales egresados de las especialidades de ingeniería geológica, ingeniería de minas e ingeniería metalúrgica,

con énfasis en la geometalurgia y la economía circular.

Los programas de estudio tienen una duración de 12 a 24 meses y se les conoce como Másteres Conjuntos MCEM (Erasmus Mundus Joint Master Degree por sus siglas “EMJMD” en inglés) debido a que el grado obtenido es avalado, al menos, por dos universidades de distintos países.

Los beneficios de esta beca comprenden un apoyo económico para transporte, alojamiento y manutención. Además de la exención del pago de tasas académicas y costes de biblioteca y laboratorio.

Javier Escalante Villanueva es bachiller en Ingeniería Metalúrgica con experiencia en operación de Plantas Concentradoras Cu-Mo e Hidrometalúrgicas, especialmente en el área de Chancado, Molienda y SX-EW. En los dos últimos años estuvo laborando en Sociedad Minera Cerro Verde.



La arquitecta Eva Arias será la presidenta del evento que se realizará del 17 al 21 de abril de 2023.

## CONGRESO NACIONAL DE MINERÍA SE LLEVARÁ A CABO EN LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO

La Universidad Nacional de Trujillo será la sede del décimo cuarto Congreso Nacional de Minería (CONAMIN 2023), tradicional encuentro organizado por el Capítulo de Ingeniería de Minas del Consejo Departamental de Lima del Colegio de Ingenieros del Perú (CD Lima – CIP), que se realizará del 17 al 21 de abril del próximo año.

“CONAMIN es un reto para demostrar que la minería puede ser sostenible en el tiempo y que, pese a los problemas nacionales, sociales y coyunturales, lograremos superar los momentos difíciles convirtiéndolos en oportunidades de desarrollo”, señaló Eva Arias, presidenta del evento que tiene como lema “Minería Sostenible: Oportunidad para Todos”. Durante su alocución, Arias, quien también es presidenta del Directorio de Compañía Minera Poderosa, expresó su

profundo agradecimiento al Ing. Germán Arce Sipán, presidente de Capítulo de Ingeniería de Minas, “por brindar la oportunidad de liderar un equipo humano de grandes profesionales los cuales pondrán todo su conocimiento y experiencia para hacer de CONAMIN 2023 una nueva propuesta de oportunidades para una minería sostenible”. Asimismo, se informó que integrarán los Comités de Trabajo los ingenieros Edgardo Alva Bazán, Jaime Tumialán de la Cruz, Walter Casquino Rey, Miguel Ángel Zúñiga Castillo, Alberto Brocos Gutiérrez, Abraham Vila Matos, Marcelo Santillana Salas, Eutemio Calderón Chumbile, Carmen Matos Avalos, Fernando Gala Soldevilla y Jorge Ardila Arévalo.

Cabe recordar que el I Congreso Nacional de Minería se realizó en 1996, en la ciudad de Cajamarca y fue presidido por el Ing. Máximo Romero Rojas.



## QUELLAVECO PROCESARÁ LA TOTALIDAD DE SUS RELAVES PARA RECUPERAR COBRE



**Esto será posible con su innovadora planta de flotación de partículas gruesas que estará operativa para el segundo semestre de 2023.**

En todas las minas del mundo hay un porcentaje de cobre que se desecha con los relaves. Esto sucede porque no toda la roca mineralizada que sale del tajo y pasa por la molienda, alcanza el tamaño mínimo requerido para separar el mineral. En las plantas de procesos, para obtener el cobre mediante un proceso de flotación, la roca debe tener un tamaño parecido a un grano de arena de mar. De no tener ese tamaño, el mineral termina en los relaves. Hoy en día, la tecnología permite recuperar el cobre que antes se perdía en los relaves mineros. En Quellaveco, esto será posible con su novedosa planta de flotación de partículas gruesas (CPF por sus siglas en inglés). Esta será la primera planta de este tipo en el Perú. Además, por sus características y dimensiones, será la más grande del

mundo en la industria del cobre. “En Perú somos pioneros en la implementación de esta tecnología, como parte de nuestra estrategia FutureSmart Mining™ para una minería sostenible. Esta planta nos permitirá incrementar la recuperación de cobre entre 2.4% y 4%, sin consumir más agua fresca, ya que utilizaremos agua reciclada y recirculada desde los espesadores de relaves” señala Bruno Santos, gerente de proyecto CPF de Anglo American. La construcción del CPF en Quellaveco empezó hace unas semanas y se espera que la planta esté lista en el segundo semestre del próximo año.

El CPF utiliza una tecnología conocida como HydroFloat. El principio es sencillo pero muy innovador: mediante la inyección de agua y aire por la parte inferior del contenedor, se empuja las partículas más finas hacia la parte superior, las mismas que son enviadas a la presa de relaves. Las partículas gruesas son atrapadas y pasan a remolienda en molinos verticales, conocidos como vertimills, para luego entrar nuevamente al circuito de flotación convencional.

“En el proceso de chancado y molienda, la roca mineralizada debe alcanzar un tamaño de unas 165 micras, antes de entrar a flotación. Pero, al ser un proceso industrial, hay un porcentaje de partículas que tiene un diámetro mayor y se pierden en el proceso de flotación. Con el CPF de Quellaveco, atraparemos aquellas partículas de 300 micras a más, para recuperar el cobre que aún contienen. Esta será la primera mina de

Sudamérica que procesará la totalidad de sus relaves con esta tecnología, a diferencia de otras experiencias donde solo se procesan un porcentaje menor”, explica Jacksusi Contreras, Superintendente de Procesos de Concentradora de Anglo American.

Anglo American tiene experiencias exitosas con esta tecnología, ya que ha implementado un módulo CPF en la mina El Soldado, en Chile, con capacidad para procesar aproximadamente el 30% de sus relaves. El CPF de Quellaveco será diez veces más grande, con diez módulos HydroFloat, además de dos molinos vertimills, un nido de ciclones, una sala eléctrica, entre otros sistemas principales y auxiliares, acorde con el diseño de una mina digital.

Con esta tecnología, la productividad y eficiencia de Quellaveco, yacimiento minero de cobre desarrollado por Anglo American y Mitsubishi en la región Moquegua, serán de las mejores en la industria, ya que se obtendrá un mayor provecho al incrementar la recuperación del mineral que antes se perdía junto con los relaves.



## MINA COBRIZA FUE ADQUIRIDA POR UN VALOR DE US\$19.7 MILLONES POR EL GRUPO DYER



Activos de Cobriza están conformado por 59 concesiones, inmuebles, maquinaria, equipos y vehículos.

Consultores A-1, empresa liquidadora de los activos de Doe Run Peru SRL, informó que la compañía Operadores Concentrados Peruanos SAC ganó la Subasta Pública Extrajudicial de los activos que conforman la Unidad Minera Cobriza, conformada por concesiones mineras (59), inmuebles, maquinaria, equipos y vehículos, entre otros.

Operadores Concentrados Peruanos SAC fue el único postor y presentó una oferta de US\$19,700,000 millones por la mina ubicada en Huancavelica.

Cabe mencionar que durante el proceso 6 compañías (VLM Hansa SAC, Appian Capital Perú SAC, Corporación Minera

Cobriza SAC, Tecnomin Data SAC, Cobre de los Andes SAC, Operadores Concentrados Peruanos SAC) compraron las bases.

Con el dinero recaudado, se podrá cumplir con el pago de diversas acreencias, priorizando la deuda laboral con los extrabajadores de Doe Run Perú. Una posible reactivación de la mina Cobriza (Huancavelica) generará ingresos por concepto de regalías, impuesto especial a la minería e impuesto a la renta.

Cobriza tiene una producción estimada anual de 55,000 toneladas de cobre con contenido de plata, que representarían ingresos por alrededor de los US\$90 millones al año.



Engineering  
Accreditation  
Commission



## LABORATORIO MECÁNICA DE ROCAS FIGMM UNI

ÚNICO CON CERTIFICACIÓN ISO 9001-2015

### Nuestros clientes:

Nexa Resources  
Compañía de Minas Buenaven-  
tura  
Volcan Compañía Minera  
Compañía Minera Colquisiri  
MRA Asociados  
Firma Buena Ingenieros  
Compañía Minera Bateas  
AUSENCO Ingenieros

Compañía Minera Kolpa  
OHL  
JBO Ingenieros  
COINGEC Ingenieros  
Compañía Minera Caravelí  
Compañía Minera San Ignacio de  
Morocha  
Compañía Minera San Valentín  
COSAPI Ingenieros, etc.

Ensayo de propiedades  
físicas

Ensayo de compresión  
simple

Ensayo de tracción

Ensayo de compresión  
triaxial

Ensayo de constantes  
elásticas (Deformómetros  
y Strain Gauges)

Ensayo de corte directo

Ensayo de Índice de carga  
puntual (Diametral, axial  
e Irregular)

Ensayo de Abrasión Los  
ángeles

Ensayo de Análisis  
Microscópico y  
Macroscópico.



# ASPECTOS EDUCACIONALES EN EL CONTEXTO DE LA MINERÍA SOSTENIBLE

**Por: Venancio Astucuri**



Egresado de la Escuela Profesional de Metalurgia UNI (1972).  
MBA en Administración de Empresas de la Universidad ESAN.

## Introducción

La actividad minera se caracteriza por requerir Capital Humano CALIFICADO para alcanzar las exigencias de ser una actividad sostenible. Las razones fundamentales las encontramos en el Desarrollo Tecnológico que se ha alcanzado a la fecha y los nuevos productos y servicios que vienen apareciendo como consecuencia del desarrollo mundial y que la minería buscando ser sostenible tiene que adoptarlos.

Los diferentes operadores, supervisores y profesionales que requiere la actividad minera deben contar con calificaciones acordes con el desarrollo sostenible y que los hayan logrado en las instituciones educativas que deben tener incorporados en sus respectivas mallas curriculares, conocimientos tales como, tales como habilidades blandas, conocimientos

de tecnologías actuales y futuras, desarrollo social y cuidado del medio ambiente, entre otros. A ello debemos sumar talleres, cursos presenciales, semipresenciales o virtuales que tengan por objetivo la actualización de conocimientos, el ahondamiento en temas de sostenibilidad y considerar que la actividad minera usa diferentes disciplinas de conocimiento, todos los procesos de enseñanza aprendizaje deben apuntar a la integración de estas disciplinas considerando el trabajo en equipo y las actividades multidisciplinarias como las mecánicas, eléctricas, instrumentación, medio ambiente, desarrollo social, entre otros, que desarrolla.

Finalmente al no existir actividades mineras iguales y que más bien cada una de ellas tiene características propias obliga a que el capital humano sea preparado adecuadamente a dicho requerimiento. Un adecuado plan de capacitación desarrollado por la propia empresa o por terceros se hace necesario. Dentro de estos planes los de entrenamiento o capacitación especializada y adecuada a las necesidades es obligatorio, los centros educativos siempre brindarán conocimientos GENERALES de la actividad minera que requieren, ser afinadas

acorde con las necesidades de cada actividad en forma mas específica, un camino puede ser el que esté ligado a las competencias.

## Competencias

Si tomamos como premisa que el recurso humano que requiere la actividad minera es muy especializada y altamente calificada se hace indispensable la capacitación y el entrenamiento y creemos que es imprescindible tratarlo por la vía de las Competencias del capital humano para todos los niveles.

## Competencia laboral del capital humano de la Actividad Minera

La alta variabilidad presente en la actividad minera tales como precios de los metales, innovación, rotación de capital humano, entre otros, hace que el sector minero se vea en la necesidad de transformar sus conceptos relacionados con la producción, que hoy por el fuerte accionar de la innovación tecnológica, la velocidad de la tecnología de información y de las mejores prácticas de negocios, los lleva a buscar la rentabilidad de sus negocios en forma sostenida, en el capital humano.

Hoy, en un diagnóstico sincero y abierto podemos decir que muy pocas empresas, están preparadas para afrontar este reto, más bien no se percatan que las pérdidas que hoy pueden ser ocultas por sus ganancias gracias al alto precio de los metales, pudieron ser reducidas y/o eliminadas si su estrategia central se focalizara en el capital humano. El desarrollo de la minería en todas sus escalas, ha convertido al Perú en un sector productivo estratégico, muestra de

ellos son los niveles de exportación que se han incrementado notablemente en estos últimos años.

Los éxitos gerenciales de las Unidades Mineras que pudieron apostar por mejorar frente al cambio (mejora continua), se basaron en el desarrollo de las competencias laborales de sus trabajadores, quienes son competentes por que gestionan sus recursos personales (conocimientos, habilidades, actitudes, destrezas y valores) así como del entorno (tecnología, organización, otros) para responder a situaciones complejas, y desarrollan sus actividades según criterios de éxito explícitos y obteniendo los resultados esperados, con el consecuente valor agregado

Creemos que el futuro de la Actividad Minera debe estar en su capital humano, siempre y cuando estos sean altamente competitivos. Ello adicionalmente estará fortaleciendo la productividad de las empresas, con los altos beneficios que eso conlleva.

## La Actividad Minera y un Sistema de Competencias

Considerando la importancia del capital humano en la sostenibilidad de la actividad minera, se hace necesario un ahondamiento en las competencias que debe exigirse a toda persona que es requerida para realizar acciones en la actividad minera.

## Características de la Actividad Minera

La Actividad Minera presenta características muy especiales y a la vez de muy alta



complicación por aquello que no hay una mina igual o no hay un mineral igual.

El sector minero se presenta como un mercado maduro, con un crecimiento constante en su participación en el PBI, y en un proceso de afianzamiento de la Gran Minería, así como de la Mediana Minería. Llegando incluso a que la pequeña minería esté presente y por los éxitos de la actividad despierta el ingreso de grupos de INFORMALES que en un accionar totalmente ilegal también desarrollan actividades mineras con relativo éxito. La creación de nuevos puestos de trabajo en los próximos años, prolongará la presión por la contratación de mano de obra calificada, más aun si ésta presenta altos niveles de competencia. La concentración de la actividad en algunas zonas del país tienden a hacer aún más escasa la mano de obra calificada.

Los factores anteriores hacen necesario un mecanismo que facilite la reconversión laboral y considere la experiencia de esta fuerza laboral, para hacer frente a la presión por mano de obra calificada, que termina por subir las remuneraciones del sector. Por último, el crecimiento de la fuerza laboral contratista, principalmente en áreas de operación y apoyo de la Gran Minería, hacen crítica la necesidad de algún sistema de control de calidad de las operaciones, antes de su



contratación.

### Conclusiones para un sistema de competencias en la actividad minera

La distribución por edad, de la fuerza laboral de la Gran Minería, presenta la necesidad de un recambio en los próximos años. Esto, unido a los nuevos puestos de trabajo, significa una gran presión por mano de obra calificada, con altos niveles de competencia laboral. El bajo nivel de calificación de la fuerza laboral de recambio presenta el desafío de asegurar sus habilidades por otro sistema que no sea el de la educación formal y es ahí donde aparece el concepto de calificación por Competencias.

Los altos índices de accidentabilidad en la Minería Nacional (Mediana, pequeña y artesanal) con respecto a los índices de la Gran Minería y de la Minería Internacional, reflejan la falta de competencias en los temas de seguridad e higiene en el área, por parte de la fuerza de trabajo de recambio.

Urge un sistema que permita identificar con claridad las diferencias entre las competencias requeridas por la Gran Minería y las existentes en la fuerza laboral de recambio y que ayude a superarlos, asimismo en los últimos años, un crecimiento constante de la rotación laboral de la Gran Minería. Esta tendencia,

creciente se da también a nivel mundial, presenta el desafío de hacer más transparente el mercado de las contrataciones, disminuyendo el costo de transacción de éstas.

La alta variabilidad en los índices de productividad entre los diferentes centros mineros denota diferencias en las tecnologías aplicadas y los métodos de explotación. Esto levanta el requerimiento por un sistema que reconozca las habilidades comunes a la industria minera y entregue mayor claridad en el contexto de mayor rotación entre operaciones mineras. Por otro lado, el desarrollo tecnológico y la búsqueda de aplicación de la nueva tecnología ha empujado a los proveedores a competir, ya no por precio o tecnología, sino por servicios. Esto repercute en una presencia cada vez mayor de proveedores en la ejecución de tareas de operación y mantenimiento de equipos de alta tecnología.

Asimismo, el rápido avance de la tecnología hace que la capacitación específica u orientada a la ejecución de funciones quede rápidamente descontinuada u obsoleta. Por último, el reemplazo de puestos de trabajo por el desarrollo tecnológico o el uso de las nuevas tecnologías hace necesario capacitar al trabajador con grados crecientes de flexibilidad dentro de la organización, que permitan su rápida reconversión hacia otras tareas.

### Las tendencias para un sistema de competencias

Los aspectos señalados anteriormente finalmente pueden ser expuestos en las

siguientes conclusiones en relación a un Sistema de Competencias en el seno de la actividad minera.

Se constata la presencia de un número cada vez mayor de personal con responsabilidades directas en los costos de producción de mineral y de mantenimiento de equipos de alta tecnología. También, se observa un número creciente de actividades de la cadena de valor de las operaciones mineras entregadas a contratistas. Por último, se observa la creciente participación de proveedores de tecnología en la operación y mantenimiento de sus productos.

Todos estos factores hacen necesario un sistema de control de calidad que permita asegurar con anterioridad a la ejecución de las tareas la calidad del resultado final. Asimismo, este sistema permitiría una selección más efectiva de proveedores y contratistas.

De acuerdo a las tendencias antes definidas, también se hace necesario establecer las nuevas competencias que un Supervisor deberá poseer, así como los mecanismos necesarios para que este supervisor adquiera estas competencias.

Ante la necesidad manifiesta de las áreas de RR.HH., de contar con un mecanismo de desarrollo de personas que responda a las necesidades de la operación, se requiere el levantamiento de un sistema de desarrollo de personal que logre alinear las necesidades de operación con la oferta de capacitación en el mercado, sin el riesgo de quedar atado a un solo organismo capacitador, llegando incluso la posibilidad que sean las mismas empresas



COLUMNA DEL EGRESADO ▶

mineras las que desarrollen sus propios centros de entrenamiento y capacitación. Por último, todo sistema de recursos humanos debe permitir el crecimiento horizontal del personal en la organización, por lo tanto, debe estar organizado en base a habilidades y no cargos o funciones.

Por lo tanto, la demanda de talento en puestos profesionales y técnicos, en un marco de cuidado del ambiente y desarrollo sostenible, se prevé significativa, tanto en el Perú como

Para operadores puede ser por ejemplo una guía los que se señala a continuación:

1.-Conocimientos SABER												
	Requerimiento	Educación Primaria	Educación Secundaria	Instituto Tecnológico	Universitario	Licencia de conducir AII	Especialización	Conocimiento del equipo, sus partes, funcionamiento	Redacción de informes	Obligación y derecho de los trabajadores según el Ds 046	Obligación y derecho de los trabajadores según el Ds 046	Origen de las señales de emergencia y otros parámetros que detalla el panel de control
Puesto de Trabajo												
Operador de camión				X		X	X	X	X	X	X	X

2.-Habilidades SABER HACER																								
		Aptitudes																						
	Requerimiento	Política de Desarrollo Sostenible	Identificación de peligros y evaluación de riesgos	Análisis de riesgos	Primeros Auxilios	Fluidos de perforación	Selección y aplicación de brocas/triconos	Técnicas de perforación	Inspecciones	Equipos de protección personal	Orden y Limpieza	Procedimientos escritos de trabajo	Investigación de accidentes e incidentes	Preparación y Respuesta a emergencias	Manipulación de explosivos	Prevención y control de incendios	Transporte de explosivos	Tránsito de vehículos	Tormentas eléctricas	Vigías	Trabajos en aula	Espacios confinados	Apertura de Zanjas	Trabajos en caliente
Puesto de Trabajo																								
Operador de camión		X	X	X					X	X	X	X	X	X		X		X	X					X

◀ COLUMNA DEL EGRESADO

3.- Actitudes SABER HACER								
		Actitudes						
	Requerimiento	Motivación	Empatía	Flexibilidad	Liderazgo	Responsabilidad	Comunicación	Inteligencia emocional
Puesto de Trabajo								
Operador de camión		X	X	X	X	X	X	X

Para el caso de los profesionales puede adoptarse las siguientes competencias:

Competencias generales

- a) Comunica ideas y resultados.
- b) Gestiona información.
- c) Trabaja en equipos multidisciplinarios, asumiendo el liderazgo en las materias inherentes a su profesión.
- d) Muestra compromiso ético.

Competencias específicas

- 1) Analiza datos y elabora modelos.
- 2) Diseña e implementa soluciones óptimas de ingeniería en el marco del desarrollo sustentable.

3) Evalúa y optimiza técnica y económicamente procesos y proyectos de ingeniería en el ámbito de la industria minera.

4) Emprende e innova en el desarrollo de soluciones a problemas de ingeniería que la actividad minera requiere.

5) Investiga sobre el desarrollo de la automatización para su aplicación exitosa en la ctividad minera.

6) Analiza la legislación minera con actitud crítica para su correcta interpretación y aplicación en la actividad minera.

7) Analiza los factores de comercialización de los minerales y metales..

Referencias

- 1. EL SECTOR MINERO Y UN SISTEMA NACIONAL DE COMPETENCIAS, Estudio Privado, Setiembre 2009, Lima
- 2. Venancio Astucuri, Son importantes las competencias, para el ingeniero de minas?, Revista Minería, 61-64, Febrero 2017, Lima, Perú



# COMISIÓN ORGANIZADORA DEL REENCUENTRO DE EGRESADOS REALIZA IMPORTANTE DONACIÓN DE MOBILIARIO PARA LA BIBLIOTECA DE LA FACULTAD

La Comisión Organizadora del Reencuentro de Egresados FIGMM UNI 2019 realizó una generosa donación de equipo mobiliario para la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería, por un valor estimado de más de 10 mil soles.

Muebles recibidores, estantes a medidas específicas, entre otros, fueron entregados para el beneficio de estudiantes, profesores e investigadores.

Los exalumnos y actuales ingenieros Abdón Ciro Guillen Medina, Jorge Luis Valverde Vega, José Luis Chiclla, en representación de la comisión, visitó al Dr. Ing. Santiago Valverde Espinoza en la facultad, para hacer entrega oficial de la donación. Por su parte, la autoridad entregó un diploma de reconocimiento por tan loable gesto.

Este esfuerzo es fruto de lo recaudado del último reencuentro de egresados en el marco del reencuentro en el marco de PERUMIN 34 Convención Minera. Cabe mencionar que el próximo reencuentro de egresados se llevará a cabo el 27 de septiembre a las 20:00 horas en el Salón de Recepciones Flor y Fiesta de Arequipa.



La comisión estuvo organizada por Abdón Ciro Guillen Medina, Jorge Luis Valverde Vega, José Luis Chiclla Silva, Pavel Martin Oropeza Mora, Luis Alex Reynafarge Herrada, Miguel Grimaldo Alvarez Huyhua.



## GASES DE EFECTO INVERNADERO GENERADOS POR LA EXTRACCIÓN DE ORO. EL EJEMPLO DE LA MINA APUMAYO, PERÚ

### RESUMEN

En el Perú, a la fecha, no se han establecido metodologías que evalúen los efectos de las actividades productivas en el cambio climático, probablemente debido a que se no cuenta con investigación que demuestre estos efectos en el ámbito nacional. La minería es la que mayores avances en regulación ambiental ha tenido en los últimos años, ésta no cuenta con investigaciones enfocadas al cambio climático en casos específicos en el Perú. Sin embargo, existen herramientas de cálculo como la huella

**Por: Isabel Mercedes Solórzano Ortiz y Santiago Gualberto Valverde Espinoza**

Universidad Nacional de Ingeniería  
Lima- Perú.

[isolorzano.ortiz@gmail.com](mailto:isolorzano.ortiz@gmail.com)

[svalverde@uni.edu.pe](mailto:svalverde@uni.edu.pe)



de carbono, que mide la cantidad total de gases de efecto invernadero (GEI) generados por una actividad y nos da un alcance de los impactos en el cambio climático de esta actividad o actividades. En ese sentido, el objetivo del estudio fue determinar

la huella de carbono generada por las actividades de explotación de una mina de oro en el Perú, y así dar un alcance de los impactos de esta actividad en el cambio climático, tomando como base la explotación de un yacimiento aurífero conformado por rocas volcánicas y depósitos cuaternarios. Como resultado se obtuvo que, debido al significativo volumen de petróleo utilizado durante el transporte de mineral y desmonte mediante camiones volquete, la explotación de un yacimiento de oro en el Perú contribuye considerablemente con GEI y por ende al cambio climático. Las emisiones totales de GEI o huella de carbono por las actividades de producción de oro en la mina Apumayo en el año 2017 fueron de 24977.1 tCO<sub>2</sub>eq.

### Introducción

El Perú es un país de bajas emisiones de GEI, con un porcentaje de participación mundial de solo 0.3 % sobre el total de emisiones. No obstante, presenta hasta siete de las nueve características reconocidas por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) para calificar como un país “particularmente vulnerable”, debido a su alto grado de vulnerabilidad ante amenazas de origen

hidro-meteorológico, como sequías y lluvias excepcionales, inundaciones, heladas, entre otros (MINAM, 2016).

A la fecha, en el Perú se cuentan con los Inventarios Nacionales de GEI los cuales han permitido identificar los sectores económicos con las mayores emisiones generadas y promover esfuerzos nacionales de gestión de emisiones (MINAM, 2018). Sin embargo, no se ha realizado una contabilización detallada de todas las emisiones de GEI de las actividades directas o indirectas que involucran a una organización o la producción de un bien o servicio, conocida como “huella de carbono”.

Algunas empresas mineras han publicado de manera voluntaria (mediante sus reportes de sostenibilidad), las emisiones de GEI producidas de manera directa e indirecta por sus actividades (Minera Yanacocha S.R.L., Compañía Minera Antamina S.A. y Gold Fields La Cima S.A.), en términos de toneladas de dióxido de carbono equivalente. Sin embargo, estos reportes no muestran el detalle de la estimación de las emisiones, por lo que no permite la interpretación de los datos y tampoco permite realizar propuestas de mejora de la gestión ambiental minera.

Por ello la presente investigación, basada en la tesis para obtener el grado de maestro de Solórzano (2019), constituye el primer análisis de la “huella de carbono” de una unidad minera aurífera en el Perú, el cual bien puede ser usado como referente

para próximas investigaciones y ampliar la información relacionada a este tema. Además, es importante mencionar que la tesis también presenta propuestas para la reducción o neutralización de las emisiones calculadas, con la aplicación de medidas de eficiencia energética y mejores prácticas ambientales

### Objetivos

1. Calcular la huella de carbono de la mina Apumayo, resultado de las emisiones de GEI generadas por todas las actividades (directas e indirectas) y áreas de soporte involucradas en la producción de las barras de oro.

2. Identificar las actividades con potencialidad de aplicación de mejoras para la reducción de la huella de carbono en la mina Apumayo

### Zona de estudio

El cálculo de la huella de carbono consideró todas las actividades ejecutadas en el año 2017, en la mina Apumayo, desde el minado hasta la obtención de las barras de oro.

### Localización

Geopolíticamente, la mina Apumayo se ubica al sur de Perú, en el departamento de Ayacucho, distritos de Sancos y Chaviña; y, geológicamente se ubica sobre una secuencia de rocas del grupo barroso constituido por rocas volcánicas de naturaleza lávica; y del grupo Tacaza formado por una secuencia estratigráfica

de unidades sedimentarias, intercalaciones volcánico-sedimentarias, rocas volcánicas y depósitos cuaternarios recientes.

### Proceso Productivo

La mina Apumayo realiza la explotación mediante el método de extracción a tajo abierto con voladura controlada de tres yacimientos (Apumayo, Huamanloma y Ayahuanca) con contenido de oro con reservas probadas 10.1 millones de toneladas de mineral. Seguidamente realiza el tratamiento del mineral extraído mediante el proceso metalúrgico de lixiviación en pilas con solución cianurada, para luego procesar la solución rica en la Planta Merrill Crowe hasta la obtención de las barras de oro

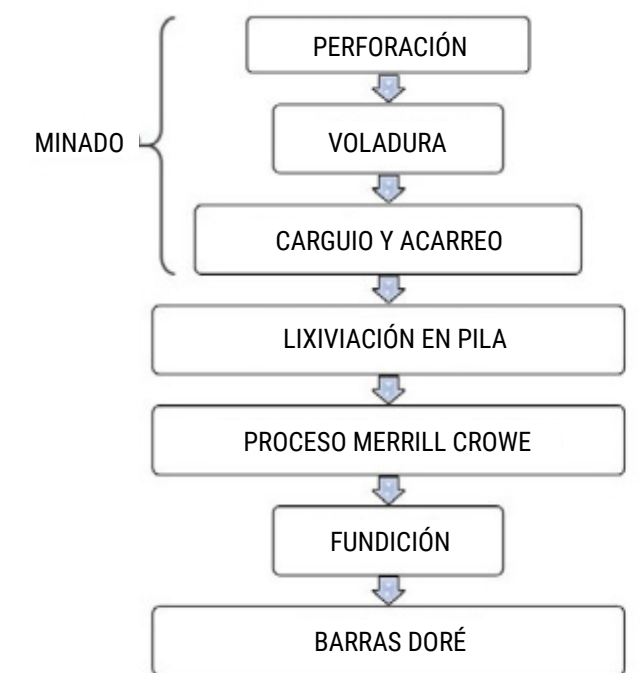


Figura 1. Etapas del Proceso de Producción de Oro en la mina Apumayo. (Mina Apumayo, 2018).

#### 1. Minado.

Consiste en la extracción del material que



contiene oro en el yacimiento realizado por el método a Tajo Abierto a un ritmo de 15000 TM/día. Se realiza en dos fases:

- Perforación: Se perfora el terreno para colocar los explosivos y fragmentar el suelo para el carguío.
- Voladura: Los agujeros son llenados con material explosivo, que al detonar fragmentan la roca y remueven subterráneamente el material exponiéndolo a la superficie.

2. Carguío y acarreo.

Mediante camiones de 20 toneladas de capacidad, se transporta el mineral extraído del tajo a la pila de lixiviación (Pad) de un área aproximada de 47 hectáreas, acondicionada previamente mediante técnicas estrictas de impermeabilización. Asimismo, el material con baja ley que no resulta rentable de tratamiento se transporta como residuo mineral hacia el depósito de desmonte.

3. Lixiviación en pila(Pad).

El mineral descargado en la pila de lixiviación es lavado con solución cianurada para recuperar el oro con un flujo de riego de 600 m3/h. La solución rica (cargada con oro) es llevada hacia la Poza de Solución Rica (PLS) para después de su tratamiento en la Planta Merrill Crowe, como solución pobre (sin oro), permanecer en la Poza de Solución Intermedia (ILS) y ser rebombada a la pila de lixiviación (circuito cerrado).

4. Proceso Merrill Crowe.

Proceso al que es sometida la solución rica en oro.

Primero es clarificada para reducir los sólidos en suspensión; luego se elimina el oxígeno para finalmente añadir polvo de zinc para precipitar el oro y pasar al proceso de refinería.

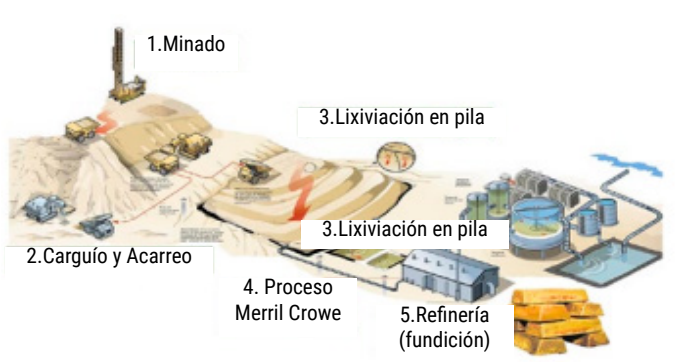


Figura 2. Esquema de la Producción de Oro en la mina Apumayo (Mina Apumayo, 2018).

5. Fundición.

El precipitado de oro obtenido en el proceso Merrill

Crowe es sometido a operaciones de secado en hornos de retortas a 650°C. Finalmente, el producto obtenido pasa por un proceso de fundición para obtener las barras doré como producto final con una producción de 5000 onzas/mes.

Limitaciones

Dado que no existen factores de emisión para todos los materiales e insumos utilizados en el proceso productivo de la mina Apumayo, algunos valores de generación gases de efecto invernadero no pudieron ser

contabilizados. Sin embargo, se considera la hipótesis de que estos valores serían despreciables comparado con la cantidad de tCO2eq contabilizados en toda la mina Apumayo.

Metodología

La Huella de Carbono describe la cantidad de emisiones de GEI causados directa o indirectamente por una organización, producto o evento, a lo largo de su ciclo de vida. (COP20, 2015)

Se determina mediante un inventario de emisiones de GEI, medidas en toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO2eq) dado que el dióxido de carbono es el gas de efecto invernadero más significativo (Atlantic Consulting, 2009).

Para el cálculo de la Huella de Carbono de la mina Apumayo se utilizó la metodología GHG Protocol Alcance 3, la cual incluye las emisiones directas, emisiones indirectas y otras emisiones indirectas de las actividades de la organización. Esta metodología es de fácil aplicación y tiene un amplio uso a nivel internacional, contando además con el respaldo de la USAID y de la USEPA



Figura 3. Pasos de la metodología GHG Protocol utilizados para el cálculo de huella de carbono de la mina Apumayo adaptado de (GHG Protocol, 2011, pág. 19).

Paso 1: Para realizar la “identificación de las actividades hasta el alcance 3”, se realizó un listado de todas las actividades desarrolladas dentro de cada proceso y área de la mina Apumayo y se las clasificó por su alcance:

Proceso	Área asociada	Alcance
Planeamiento	Geología	Alcances 1 y 3
Minado	Operaciones Mina	Alcances 1 y 3
Carguío y acarreo	Operaciones Mina	Alcances 1 y 3
Lixiviación en pila	Planta-Pad de lixiviación	Alcances 1, 2 y 3
Proceso Merrill Crowe	Planta-Planta Merrill Crowe	Alcances 1, 2 y 3
Soporte	Fundición	Alcances 2 y 3
	Administración	Alcances 1, 2 y 3
	Almacén	Alcances 1, 2 y 3
	Seguridad de la propiedad	Alcances 3
	Laboratorio químico	Alcances 1, 2 y 3
	Casa de fuerza	Alcance 1
	Departamento eléctrico	Alcance 1
	Taller mantenimiento mecánico	Alcances 1, 2 y 3
	Centro médico	Alcances 1, 2 y 3
	Ingeniería	Alcances 1 y 3
	Medio Ambiente	Alcances 1, 2 y 3
	Comedor	Alcances 1, 2 y 3

Tabla 1. Alcances según la metodología GHG Protocol por proceso y área asociada de la mina Apumayo (Solórzano, 2019).

Paso 2: Se estableció el alcance de las actividades de todas las áreas involucradas en la operación de la mina Apumayo, siguiendo los lineamientos del GHG Protocol.

- Alcance 1: Emisiones provenientes de la combustión de combustibles fósiles como petróleo diésel en equipos motorizados y Gas Licuado de Petróleo (GLP) en las cocinas del comedor.

- Alcance 2: Emisiones por el uso de energía eléctrica adquirida del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) en los



equipos de procesamiento (lixiviación, proceso Merrill Crowe y fundición), así como en instalaciones auxiliares (oficinas, campamento, laboratorios, talleres, etc.).

- Alcance 3: Emisiones por el transporte y consumo de insumos y materiales y por la generación de residuos sólidos y su transporte al lugar de disposición final.

Paso 3: De acuerdo a los alcances definidos para cada uno de los procesos y áreas involucradas se recolectó la data con el apoyo de personal clave de la mina Apumayo.

Paso 4: Finalmente la asignación (cuantificación) de emisiones para cada tipo de alcance se realizó utilizando las siguientes fórmulas:

Cuantificación de las emisiones de GEI del alcance 1

Esta contabilidad sólo incluye las emisiones por consumo de combustibles fósiles en las diferentes áreas:

Ecuación 1. Cálculo de emisiones de GEI por combustión de Diésel B5 y GLP

$$Emisiones_1 = CC \times PCN / 106 \times (FE_{CO_2} + FE_{CH_4} \times PCG_{CH_4} + FEN_{2O} \times PN_{2O})$$

Dónde:

- Emisiones<sub>1</sub>
- : Emisiones generadas de GEI por combustión (Diésel B5 y GLP), en tCO<sub>2</sub>eq- CC: Cantidad de combustible consumido, en kg- PCN: Poder

Calórico Neto del Combustible utilizado, en KJ/kg

- FECO<sub>2</sub>, FECH<sub>4</sub>, FEN<sub>2O</sub>: Factores de Emisión de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2O</sub> del Combustible utilizado, en: kgCO<sub>2</sub>/GJ, kgCH<sub>4</sub>/GJ y kgN<sub>2O</sub>/GJ, respectivamente.

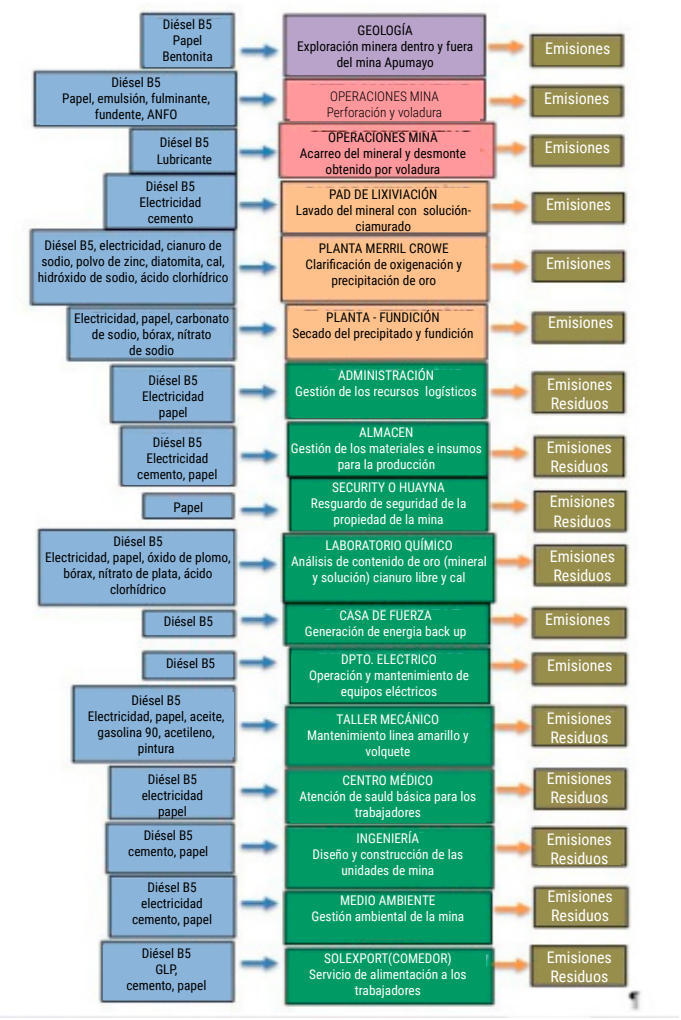


Figura 4. Ingresos y salidas en mina Apumayo (Solórzano, 2019).V- PCGCH<sub>4</sub>, PCGN<sub>2O</sub>: Potencial de Calentamiento Global del CH<sub>4</sub> y N<sub>2O</sub> (21 y 310 respectivamente).

Tipo de combustible	Poder Calorífico Neto (KJ/kg)	Densidad (kg/L)	Factor de emisión de Co <sub>2</sub> (Kg Co <sub>2</sub> /GJ)	Factor de emisión de CH <sub>4</sub> (kg/ CH <sub>4</sub> /GJ)	Factor de emisión de N <sub>2</sub> O (kg N <sub>2</sub> O/GJ)
Diésel B5	45 500	0.87	74.1	0.004	0.004
GLP	47 300	0.542	63.1	0.062	0.0002

Tabla 2. Valores de poder calorífico, densidad y factores de emisión de los combustibles REPSOL (2009), REPSOL (2011) e IPCC (1996).

Cuantificación de las emisiones de GEI del alcance 2

Esta contabilidad sólo incluye las emisiones por consumo de energía eléctrica proveniente del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN).

Ecuación 2. Cálculo de emisiones de GEI por consumo de energía eléctrica

$$Emisiones_2 = Consumo \text{ de Energía (MWh)} \times 0.547 \text{ tCO}_2/\text{MWh}$$

Donde:

- Emisiones: Emisiones generadas de GEI por consumo de energía, en tCO<sub>2</sub>eq.
- Consumo de Energía: consumo de energía total reportado en la Unidad Minera, en MWh.- 0.547 tCO<sub>2</sub>/MWh: Factor de emisión de CO<sub>2</sub> del SEIN para el año 2007 (FONAM citado por Ponce & Rodríguez, 2016)

Cuantificación de las emisiones de GEI del alcance 3

Para el cálculo de las emisiones de GEI del alcance 3

en la mina Apumayo se consideraron tres aspectos:

- Consumo de insumos
- Generación de residuos sólidos
- Transporte de materiales e insumos y

residuos sólidos

-Ecuación 3. Cálculo de emisiones de GEI por consumo de insumos.

$$Emisiones_{3,1} = CCI \times FE_i$$

Donde:

- Emisiones<sub>3,1</sub>: Emisiones generadas de GEI por consumo de insumos, en tCO<sub>2</sub>eq
- CCI: Cantidad de insumo consumido, en kg o litros según corresponda.
- FE<sub>i</sub>: Factores de emisión de insumos (ver Tabla 3).

Insumo	Factor de Emisión
Cal <sup>1</sup>	1.22 kgCO <sub>2</sub> cq/kg de Cal
Hidróxido de sodio <sup>1</sup>	1.42 kgCO <sub>2</sub> cq/kg de NaCH
Carbonato de sodio (NA <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ) <sup>1</sup>	2.03 kgCO <sub>2</sub> cq/kg de Na2Co3
Cemento <sup>1</sup>	0.10 kgCO <sub>2</sub> cq/kg de concreto
ANFO <sup>2</sup>	0.18 kgCO <sub>2</sub> cq/kg de ANTO
Emulsión <sup>2</sup>	0.17 kgCO <sub>2</sub> cq/kg de emulsión
Fulminante y fundente <sup>3</sup>	0.17 kgCO <sub>2</sub> cq/kg de fulminante o fundente
Lubricante <sup>2</sup>	0.081 kgCO <sub>2</sub> cq/kg de lubricante
Aceite <sup>2</sup>	0.08148 kgCO <sub>2</sub> cq/L de aceite
Gasolina 90 <sup>2</sup>	0.08126 kgCO <sub>2</sub> cq/L de gasolina
Papel <sup>1</sup>	0.00184 ton CO <sub>2</sub> cq/kg de papel

Tabla 3. Factores de emisión de insumos 1Software GaBi (Bustos Donoso, 2011), 2NGA Factors En Tabla 4 (Explosive use) (NGA, 2008) y 3(Gold Fields, 2010)

Ecuación 4. Cálculo de emisiones de GEI por generación de residuos sólidos.

$$Emisiones_{3,2} = CCr \times FE_a$$

Donde:

- Emisiones<sub>3,2</sub>: Emisiones generadas de GEI por generación de residuos sólidos, en tCO<sub>2</sub>eq



ARTÍCULOS TÉCNICOS ►

- CCr: Cantidad de residuo sólido generado según tipo, en TN.

- FEa: Factores de Emisión por tipo de residuo sólido (ver Tabla 4).

Tipo de residuo	Factor de emisión (tCO <sub>2</sub> eq/ton residuo)
Papel y cartón	2.5
Orgánicos	0.9
Vidrios	0
Metálicos	0
Plásticos	0
Peligrosos	0.3
Generales	0.9

Tabla 4. Factores de emisión por tipo de residuo sólido  
(\*) Mezclados es equivalencia con la nomenclatura extranjera. Fuente: (NGA, 2008).

Ecuación 5. Cálculo de consumo de combustible de vehículos de transporte

CC = Distancia i  
x Frecuencia i  
x Consumo

Dónde:

- CC: Consumo de combustible total (gal/año)
- Distancia: tramo recorrido para el transporte del material, insumo o residuo i en (km)
- Frecuencia: Número de veces en las que se transporta el material, insumo o residuo i al año
- Consumo: Consumo promedio de combustible del vehículo (gal/km)

Resultados

Las emisiones totales de GEI de la mina Apumayo en el año 2017 fueron de 24977.1 tCO2eq, siendo que 14869.2 tCO2eq (60%) corresponden a emisiones directas de alcance 1, un total de 8178.2 tCO2eq (33%) corresponden a emisiones indirectas de alcance 2, y además 1929.7 tCO2eq (7%) corresponden a emisiones indirectas de alcance 3.

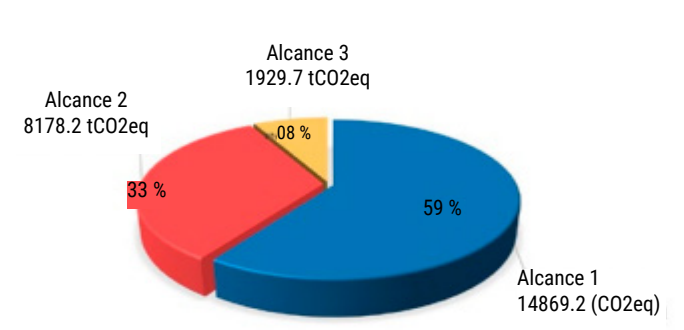


Figura 5. Emisiones según alcance de la mina Apumayo. (Solórzano, 2019)

En la Tabla 5. se presentan los consumos de la mina Apumayo para en todo el proceso del oro y el inventario de GEI por cada uno de ellos.

Alcance 1: Emisiones directas de GEI.

El mayor porcentaje de estas emisiones con aproximadamente 68% corresponden al proceso de carguío y acarreo por el consumo de diésel en camionetas, equipos pesados (volquetes, excavadoras, equipos auxiliares) y camiones cisterna. En segundo lugar, están las actividades de perforación y voladura con un 15.7% por el

◀ ARTÍCULOS TÉCNICOS

consumo de diésel en perforadoras, camión fábrica, camionetas, entre otros; y en tercer lugar se encuentra el área de soporte con un 13% por el consumo de diésel en camionetas y equipos auxiliares.



Figura 6. Emisiones de alcance 1 por proceso de la mina Apumayo (Solórzano, 2019).

Alcance 2: Emisiones indirectas de GEI.

El mayor porcentaje de estas emisiones, aproximadamente 54%, corresponden al proceso de lixiviación en pila, seguido por el proceso Merrill Crowe con un 37%, en tercer lugar, el área de soporte con un 8%, y por último el proceso de fundición con tan sólo el 1%

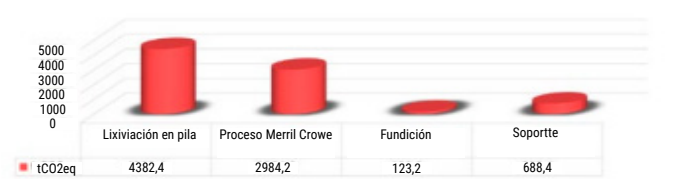


Figura 7. Emisiones de alcance 2 por proceso de la mina Apumayo. (Solórzano, 2019).

Alcance 3: Otras emisiones indirectas.

Las mayores emisiones corresponden al proceso de minado con aproximadamente

45% debido al consumo de insumos para las actividades de perforación y voladura, en segundo lugar, el área de soporte con un 32% debido al transporte de materiales, insumos y residuos sólidos, así como a la generación de residuos sólidos orgánicos en el comedor y por último, el proceso de Merrill Crowe con un 22% debido al consumos de insumos para la clarificación, desoxigenación y precipitación del oro.



Figura 8. Emisiones de alcance 3 por proceso de la mina Apumayo (Solórzano, 2019).



Tabla 5. Consumo por alcance – Inventario de GEI de la mina Apumayo

INFORMACIÓN DE CONSUMOS DE LA UNIDAD MINERA APUMAYO PARA CALCULO DE EMISIONES DE GEI-2017											
Proceso	ÁREA ASOCIADA	ACTIVIDADES PRINCIPALES	ACTIVIDADES SECUNDARIAS	ALCANCE	CONSUMO	UNIDAD 1	CONSUMO	UNIDAD 2	CONSUMO	UNIDAD FINAL	tCO2eq
Planeamiento	Geología	Exploración minera dentro y fuera (áreas de ampliación) de la Unidad Minera Apumayo	Combustible diésel en camionetas y maquinaria perforada	Alcance 1	4,322.6	gal	13,363	L	14,235.8	kg	48.9
			Papel	Alcance 3	128.6	kg					0.2
			Bentonita	Alcance 3	128.6	kg					N.D.
			Generación de residuos de papel y cartón	Alcance 3	73.6	kg	0.1	ton			0.2
Minado	Operaciones Mina	Perforación y voladura	Combustible diésel en camionetas y equipos pesados de perforación y voladura	Alcance 1	206,819.2	gal	782,895.5	L	681	kg	2,337.5
			Papel	Alcance 3	84.2	kg					0.2
			Emulsión	Alcance 3	1,675,205.0	kg					288.2
			Fulminante	Alcance 3	3,685.5	kg					0.6
			Fundente premezclado	Alcance 3	10,075.0	kg					1.7
			Nitrato de amonio (ANFO)	Alcance 3	3,220,745.0	kg					579.7
Cargulo y acarreo	Operaciones Mina	Acarreo del mineral y desmonte obtenido posterior a la voladura	Combustible diésel en camionetas y equipos pesados (volquetes, excavadoras, equipos auxiliares)	Alcance 1	899,661.5	gal	3,405,587.6	L	2,962,861.2	kg	10,167.9
			Lubricante	Alcance 3	5.0	gal	18.9	L			0.0
Lixiviación en pila	Planta Pad de lixiviación	Lavado del mineral con solución cianurada	Combustible diésel por camionetas y equipos pesados	Alcance 1	2,701.5	gal	10,226.3	L	8,896.9	kg	30.5
			Energía eléctrica	Alcance 2	8,011,787.6	kWh/año	8,011.8	MWh/año			4,382.4
			Cemento	Alcance 3	85.0	kg					0.0
Proceso Merrill Crowe	Planta-Planta Merrill Crowe	Clarificación desoxigenación y precipitación de oro	Combustible diésel en camionetas y equipos pesados	Alcance 1	30,552.9	gal	115,655.3	L	110,620.1	kg	345.3
			Energía eléctrica	Alcance 2	5,445,558.7	kWh/año	5,455.6	MWh/año			2,984.2
			Cianuro de sodio	Alcance 3	340,500.0	kg					N.D.
			Polvo de zinc	Alcance 3	175,000.0	kg					N.D.
			Diatomita	Alcance 3	49,986.7	kg					N.D.
			Óxido de calcio (cal)	Alcance 3	300,000.0	kg					366.0
			Hidróxido de sodio	Alcance 3	45,160.0	kg					64.1
			Ácido clorhídrico Industrial	Alcance 3	1,440.0	kg					N.D.
			Energía eléctrica	Alcance 2	225,238.7	kWh/año	225.2	MWh/año			123.2
Fundición	Planta - Refinería	Secado del precipitación y fundición	Papel	Alcance 3	39.8	kg					0.1
			Carbonato de sodio	Alcance 3	8,175.0	kg					16.6
			Bórax	Alcance 3	17,410.6	kg					N.D.
			Nitrato de sodio	Alcance 3	2,363.0	kg					N.D.
	Administración	Administración de los recursos logísticos	Combustible diésel en vehículos de transporte de empleados	Alcance 1	33,836.6	gal	128,085.4	L	111,434.3	kg	382.4
			Energía eléctrica en el campamento y oficinas administrativas	Alcance 2	543,435.1	kWh/año	543.4	MWh/año			297.3
			Combustible de camiones cisterna para el transporte de agua de consumo doméstico	Alcance 3	427.4	gal	1,617.9	L	1407.6	kg	4.8
			Papel	Alcance 3	851.4	kg					1.6
			Generación de residuos de vidrio	Alcance 3	473.0	kg					0.0
			Generación de residuos de metálicos	Alcance 3	30,407.0	kg					0.0
			Generación de residuos de plásticos	Alcance 3	1,289.5	kg					0.0
			Generación de residuos de papel y cartón	Alcance 3	472.5	kg	0.5	ton			1.2

Soporte	Almacén	Gestión de los materiales e insumos para el desarrollo de las actividades operativas	Combustible diésel en montacargas y vehículos de materiales e insumos dentro de la unidad minera	Alcance 1	6,496.0	gal	24,590.0	L	21,393.3	kg	73.4
			Energía eléctrica	Alcance 2	30.067.8	kWh/año	30.1	MWh/año			16.4
			Combustible diésel por los vehículos de transporte de materiales e insumos hacia la unidad minera	Alcance 3	37,770.9	gal	142,978.3	L	124,391.2	kg	426.9
			Cemento	Alcance 3	3,825.0	kg					0.4
			Papel	Alcance 3	299.4	kg					0.6
			Generación de residuos de papel y cartón	Alcance 3	299.2	kg	0.3	ton			0.7
			Papel	Alcance 3	156.7	kg					0.3
			Generación de residuos de papel y cartón	Alcance 3	15.5	kg	0.0	ton			0.0
	Seguridad de la propiedad (security) o Huayna	Resguardo de seguridad de la propiedad de la Unidad Minera Apumayo									
	Laboratorio químico	Análisis de minerales por oro, análisis de soluciones por oro, análisis de cianuro libre y cal en soluciones de lixiviación	Combustible diésel por horno	Alcance 1	106.0	gal	401.3	L	349.1	kg	1.2
			Energía eléctrica	Alcance 2	390,440.4	kWh/año	390.4	MWh/año			213.6
			Papel	Alcance 3	37.4	kg					0.1
			Óxido de plomo	Alcance 3	12,046.0	kg					N.D.
			Bórax	Alcance 3	575.0	kg					N.D.
			Nitrato de plata	Alcance 3	3.0	kg					N.D.
			Ácido clorhídrico industrial	Alcance 3	472.2	kg					N.D.
			Acido nítrico	Alcance 3	378.5	kg					N.D.
			Generación de residuos de papel y cartón	Alcance 3	236.3	kg	0.2	ton			0.6
	Casa de fuerza	Generación de energía de back up	Combustible diésel en grupos electrógenos	Alcance 1	25,982.0	gal	98,352.5	L	85,566.7	kg	293.6
	Departamento eléctrico	Operación y mantenimiento de equipos de generación eléctrica	Combustible diésel en retroexcavadoras y camionetas en mantenimiento	Alcance 1	3,448.6	gal	13,054.4	L	11,357.3	kg	39.0
	Taller mantenimiento mecánico	Mantenimiento linea amarilla, volquetes	Combustible diésel en camión lubricador, camión grúa y motacarga	Alcance 1	5,653.4	gal	21,400.4	L	18,618.4	kg	63.9
			Energía eléctrica	Alcance 2	127,847.7	kWh/año	127.8	MWh/año			69.9
			Papel	Alcance 3	63.1	kg					0.1
			Aceite	Alcance 3	963.0	gal	3,645.3	L			0.3
			Gasolina 90	Alcance 3	800.0	gal	3,028.3	L			0.5
			Acetileno	Alcance 3	714.0	kg					N.D.
			Pintura	Alcance 3	262.0	gal					N.D.
			Generación de residuos de papel y cartón	Alcance 3	1,328.4	kg	1.3	ton			3.3
			Generación de residuos peligrosos (industriales)	Alcance 3	16,104.4	kg	16.1	ton			4.8
			Generación de residuos generales	Alcance 3	28,468.0	kg	28.5	ton			25.6
	Centro médico	Atención de salud básica y principal para los trabajadores de la minera Apumayo	Combustible diésel en ambulancia	Alcance 1	481.3	gal	1,821.9	L	1,535.1	kg	5.4
			Energía eléctrica	Alcance 2	20,428.2	kWh/año	20.4	MWh/año			11.2
			Papel	Alcance 3	51.5	kg					0.1
			Generación de residuos de papel y cartón	Alcance 3	50.3	kg	0.1	ton			0.1
			Generación de residuos peligrosos (hospitalarios)	Alcance 3	46.0	kg	0.1	ton			0.0
	Ingeniería	Construcción de las facilidades requeridas para las actividades de operación de la Unidad Minera Apumayo	Combustible diésel en camionetas y equipos pesados	Alcance 1	45,082.7	gal	170,656.5	L	148,471.2	kg	509.5
			Papel	Alcance 3	180.1	kg					0.3
			Cemento	Alcance 3	21,547.5	kg					2.2
			Generación de residuos de papel y cartón	Alcance 3	65.8	kg	0.1	ton			0.2



Medio Ambiente	Gestión ambiental de la Unidad Minera Apumayo	Combustible en equipo pesado (retroexcavadora, tractor, motoniveladora, entre otros)	Alcance 1	39,479.1	gal	149,444.4	L	130,016.7	kg	446.2
		Energía eléctrica por Plantas de tratamiento de Aguas Residuales	Alcance 2	49,595.4	kWh/año	49.6	MWh/año			27.1
		Cemento	Alcance 3	170.0	kg					0.0
		Papel	Alcance 3	63.1	kg					0.1
		Generación de residuos de papel y cartón	Alcance 3	58.1	kg	0.1	ton			0.1
		Combustible en transporte de residuos hacia lugar de disposición final	Alcance 3	966.4	gal	3,558.2	L	3,182.7	kg	10.9
		Solexport (Comedor)	Provisión del servicio de alimentación a los trabajadores	Gas natural para cocina	Alcance 1	18,702.0	gal	70,794.7	L	33,370.7
Combustible diésel por horno de panadería	Alcance 1			661.0	gal	2,502.2	L	2,176.9	kg	7.5
Energía eléctrica	Alcance 2			96,621.8	kWh/año	96.6	MWh/año			52.9
Combustible en vehículos de transporte de insumos	Alcance 3			2,055.0	gal	7,779.0	L	6,767.7	kg	23.2
Papel	Alcance 3			39.8	kg					0.1
Generación de residuos de papel y cartón	Alcance 3			1,274.2	kg	1.3	ton			3.2
Generación de residuos sólidos orgánicos	Alcance 3			110,583.0	kg	110.6	ton			99.5
Fuente: Elaboración propia en base a información proporcionada por Apumayo S.A.C.				Total:24,977.1						

Discusión

En la mina Apumayo, el proceso productivo que presentó mayor cantidad de emisiones fue el de carguío y acarreo, alcanzando las 10167.9 tCO2eq y 41% de las emisiones de GEI totales, por el consumo de gran cantidad de combustible para el funcionamiento de camionetas, equipos pesados (volquetes, excavadoras, equipos auxiliares) y camiones cisterna para el riego de vías.

Por otro lado, los procesos de lixiviación en pila y de Merrill Crowe también tienen un alto porcentaje de emisiones de GEI por su alta demanda eléctrica, representando en conjunto el 33% de las emisiones totales.

Por último, las actividades del área de soporte, representaron un 13% de las emisiones de GEI totales, debido al consumo de combustible para el transporte de personal, materiales e insumos; el consumo de energía eléctrica en el campamento, centro médico y otras áreas auxiliares, así como las emisiones por la generación de residuos sólidos y su transporte hacia el lugar de disposición final.

Debido a que, en el año 2017, las emisiones totales de GEI fueron de 24977.1 tCO2eq y la producción de oro

60185 onzas troy (1.88 toneladas), se tiene que la ratio de emisión de GEI de la mina Apumayo fue de 13150.6 tCO2eq/t Au producido.

Las emisiones obtenidas en la mina Apumayo fueron comparados con los resultados presentados en los reportes de sostenibilidad de minas de oro similares como Yanacocha y Cerro Corona de Gold Fields

Figura 9. Emisiones totales por proceso de la mina Apumayo. (Solórzano, 2019).

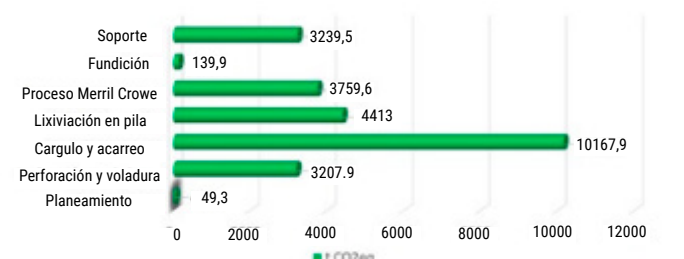


Tabla 6. Ratio de emisión de GEI por unidad de producto para diferentes mineras de oro. Fuente: (Solórzano, 2019). Equivalencia: 1 tonelada = 32150.7 onzas troy.

Minera	Año de calculo	Producción de Au (onzas/año)	Producción de Au (t/año)	Emisiones totales de GEI (tCO2eq)	Ratio de emisión de GEI (tCO2eq/t Au)
Yanacocha	2013	101700	31.63	583,300.0	18441
Cerro Corona	2016	150210	4.67	80577.0	17254
Apumayo	2017	60.85	1.87	24977.1	13357

CONCLUSIONES

- Las emisiones totales de GEI o huella de carbono por las actividades de producción de oro en la mina Apumayo en el año 2017 fueron de 24977.1 tCO2eq.

- La ratio de emisión de GEI de la mina Apumayo en el año 2017 fue de 13357 tCO2eq/t Au producido, por debajo de lo presentado en los reportes de sostenibilidad de Yanacocha (18441 tCO2eq/t Au) y Cerro Corona de Gold Fields (17254 tCO2eq/t Au).

- El proceso de carguío y acarreo representó el 41% de las emisiones totales de GEI de la mina Apumayo, principalmente por el consumo de combustible en vehículos pesados como volquetes, tractores, cargadores frontales.

- Existen diferentes estrategias que pueden ser implementadas para reducir la huella de carbono en una mina de producción de oro. En principio se deben implementar indicadores de ecoeficiencia para lograr una gestión eficiente en la organización y de esta manera reducir actividades innecesarias que incrementen los GEI.

RECOMENDACIONES

- Ampliar el análisis de la presente investigación estudio para un mayor periodo, por ejemplo, de los últimos 5 años y, de ser posible, para todo el ciclo de vida de la mina Apumayo, incluyendo también las etapas de construcción y cierre.

- Plantear estrategias para la reducción de los GEI en los procesos donde registraron los mayores valores. Las estrategias pueden considerar medidas de eficiencia en el uso de recursos, cambio de tecnología, optimización de los procesos, permuta del tipo combustible (por ejemplo, petróleo a gas natural), entre otros.

- Realizar mayores investigaciones en cuanto a Huella de Carbono relacionadas a proyectos de inversión en el Perú, con el fin de contar con una buena data de información que permita medir el desempeño de cada actividad productiva.

REFERENCIAS

1 Atlantic Consulting. 2009. Huella de Carbono del GLP en relación a otros Combustibles.

2 Bustos Donoso, J. F. 2011. Análisis de la Huella de Carbono en una Empresa Minera del Cobre en Chile. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.

3 COP20, L. 2015. LIMA COP20. Recuperado el 2018, de ¿Cómo se mide la Huella de Carbono?: <http://cop20.minam.gob.pe/22973/como-se-mide-la-huella-de-carbono/>

4 FONAM, R. R. & Rodríguez, D. A. 2016. Determinación de la Huella de Carbono del Country Club el Bosque – Sede Chosica”. Trabajo de Titulación para Optar el Título de Ingeniero Forestal. Universidad Nacional Agraria la Molina. Lima.

5 GHG Protocol. 2011. Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard. World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development.

6 Gold Fields. 2010. Carbon Footprint Report. Financial and Calendar year 2009. Promethium Carbon (Pty) Ltd.

7 Mina Apumayo. 2018. Esquema de la Producción de Oro en la mina Apumayo, Perú.

8 MINAM. 2016. La Contribución Nacional del Perú - iNDC: agenda para un desarrollo climáticamente responsable. Lima: Ministerio del Ambiente.

9 MINAM. 2018. INVENTARIO NACIONAL DE GASES DE EFECTO INVERNADERO. Obtenido de INFOCARBONO: <http://infocarbono.minam.gob.pe/inventarios-nacionales-gei/intro/>

10 NGA. 2008. National Greenhouse Accounts (NGA) Factors. Australia: Commonwealth of Australia

11 Solórzano, I. 2019. Estimación de la Huella de Carbono en la Unidad Minera Apumayo para el año 2017 y Propuestas para su Incorporación dentro del Estudio de Impacto Ambiental detallado. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.



## “MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN DE MINAS PARA SUMINISTRAR AIRE LIMPIO A LAS LABORES SUBTERRANEAS”

Ing. DIONISIO CÁRDENAS GONZALES .

Asesor: MSc. Ing. EFRAIN CASTILLO ALEJOS

### RESUMEN

El presente estudio tiene por objeto analizar y optimizar la actividad de ventilación en el ciclo de minado, a fin de minimizar los accidentes mortales e incapacitantes por gaseamiento, ver Anexo 1, Accidentes en minas de la Gran y Mediana Minería, fuente MINEM.

Se realiza los cálculos del cumplimiento de las necesidades de aire fresco (trabajadores, equipos, dilución de contaminantes y temperaturas extremas) en los tajeos de producción, las rampas de profundización, by passes, cruceros y niveles inferiores de preparación, según las necesidades (VOD), con los que se logra la producción con seguridad, cumpliendo las normas del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería aprobado por Decreto Supremo N° 024- 2016-EM y sus Modificatorias del Decreto Supremo N° 023-2017-EM (en adelante, RSSO). Se realiza los cálculos de cobertura de ventilación de la explotación minera, a fin de mejorar el sistema de ventilación, aumentando la eficiencia del trabajador y de los equipos.

Se muestra la infraestructura tales como chimeneas:raise borer (RB), galerías y labores para el movimiento del aire, ventiladores, instalaciones, tapones, cortinas y mangas de ventilación adecuadas, que minimizan el riesgo a exposición de gases nocivos. Asimismo, se muestran los problemas en casos de fallas y los costos asociados.

Se explica el empleo de modelos basados en la aplicación de software de ventilación, tales como el Ventsim y Vnet en el planeamiento de ventilación, se realiza el modelado de la mina, simulando y calibrando el circuito de ventilación optimizando el sistema de ventilación, así como los costos.

### INTRODUCCIÓN

El resultado de mi experiencia en el campo minero y especialmente en los temas de ventilación, me permite afirmar que, en todas las operaciones mineras, la primera actividad es verificar el buen estado de la ventilación.

En operaciones mineras subterráneas se presentan muchos gases nocivos, CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NO producto del empleo de explosivos

en las voladuras, principalmente si se utiliza ANFO, CO<sub>2</sub> de la descomposición de la madera,degases presentes en las estructuras calcáreas, CO, CO<sub>2</sub>, de la combustión del petróleo generado por equipos diésel; también altas temperaturas generado por los motores de combustión y profundización de las minas. Por tanto, se tiene que extraer estos gases continuamente, empleando ventiladores extractores, e inyectores de aire fresco a los frentes y tajeos, para tener un ambiente saludable, manteniendo los gases de oxígeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, gases nitrosos y otros dentro de los límites máximo permisible (LMP) que indica el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional, Decreto Supremo 023-2017-EM.

De acuerdo a las estadísticas del MEM, hasta julio de 2022 se tienen 12 accidentes mortales, de los cuales 5 son por gaseamiento, sin embargo un análisis de las otras causas de accidentes mortales: caída de personas, derrumbes, caída de rocas y otros son indirectamente, debidas también a falta de una buena ventilación, porque al no visualizar en el techo de un tajeo una roca suelta, por un ambiente lleno de humo, se produce un accidente por caída de roca en el trabajador; en el caso de caída de personas al mismo nivel o a diferente nivel también es posible considerar que la falta de ventilación ha producido un ambiente que no permite buena visualización del piso. En el

presente estudio se explica cómo optimizar la ventilación de la mina, proporcionando la velocidad y la cantidad de aire requerida por el personal, equipos y otros, dentro de la calidad exigida por el RSSO, implementando ventiladores adecuados, controlando los LMP de los gases, en las labores de trabajo, aplicando software de ventilación para modelar y simular la ventilación de futuras labores programadas con chimeneas, ventiladores y reguladores y estimar el caudal necesario.

### GENERALIDADES

La ventilación de minas es la principal actividad que permite el buen desarrollo del laboreo minero.

#### Problema General

Según lo descrito en el ítem anterior, el problema de investigación se resume en la siguiente pregunta:

¿De qué manera influye el mejoramiento de ventilación, en la prevención de accidentes por gaseamiento?

#### Problemas Específicos

Se formularon las siguientes preguntas específicas:

- ¿Revisan y mejoran los circuitos de ventilación para evitar accidentes?
- ¿Realizan la actualización y mejoramiento de software para eliminar accidentes?
- ¿Se supervisa y fiscaliza la infraestructura para eliminar pérdidas de aire del sistema de



ARTÍCULOS TÉCNICOS ►

ventilación?

d) ¿Se analiza la matriz de riesgo para identificar, ubicar y controlar los riesgos del sistema de ventilación?

e) ¿Se realizan constantes monitoreos de gases para ubicar las posibles faltas al RSSO?

Justificación e importancia de la investigación

El presente trabajo se centra en el estudio de los procesos operativos de la ventilación de minas, a fin de mejorar el sistema de ventilación de cualquier unidad minera, para reducir los accidentes mortales e incapacitantes por gaseamiento, ver Anexo 1, Accidentes en la Gran y Mediana Minería. Fuente: Ministerio de Energía y Minas Estadística (julio 2022).

Objetivo General

Describir los procesos de ventilación para mejorar la dotación de aire en calidad y cantidad suficiente para todos los trabajadores minimizando los riesgos por gaseamientos (accidentes mortales por falta de oxígeno) y enfermedades ocupacionales mediante las mejoras en el planeamiento, circuitos, infraestructura y otros.

Objetivos específicos

- 1. Realizar un mejoramiento de los circuitos de la ventilación para eliminar accidentes por gaseamiento.
- 2. Mejoramiento y actualización del software empleado en las minas que optimizará el

- sistema de ventilación de las labores futuras.
- 3. Elaborar un diseño óptimo de la infraestructura de ventilación (puertas, cortinas, reguladores, ventiladores, chimeneas, labores abandonadas), para eliminar pérdidas en ventilación (presión y caudal).
  - 4. Aplicar la Matriz de riesgo de supervisión en ventilación en las unidades mineras, específicamente cumplir el RSSO para mantener las condiciones termo-ambientales confortables y eliminar accidentes del trabajador minero.
  - 5. Realizar los monitoreos con equipos calibrados a fin de conocer la calidad y cantidad de aire y aplicar los controles.
- Hipótesis General
- El mejoramiento del sistema de ventilación reducirá a cero los accidentes por gaseamiento en las minas peruanas.
- Hipótesis específica
- El planeamiento óptimo, diseño efectivo de la infraestructura, el estudio y la evaluación integral, modelamiento y auditorias del sistema de ventilación cumpliendo con la legislación vigente del RSSO, reducirá a cero los accidentes por gaseamiento en los tajeos, rampas, subniveles, by passes, cruceros, ventanas y demás labores mineras.
- Variables
- Se consideran las siguientes variables:
- Variable independiente
- Son las mejoras en: Cantidad y calidad

de aire; planeamiento de ventilación, infraestructura de ventilación (ventiladores, mangas, arrancadores).

Variable dependiente

Suministrar aire fresco cumpliendo los límites de exposición ocupacional para agentes químicos (>de 19.5% O<sub>2</sub>, CO de 3 m<sup>3</sup>/min por persona hasta 1,500 msnm y 6 m<sup>3</sup>/min por persona sobre los 4,000 msnm, según la Legislación Vigente del RSSO (Ver Anexo N°3).

Indicadores

En el caso de la variable independiente, serán las estadísticas de accidentes, el flujo de aire en calidad y cantidad.

Los indicadores de la variable dependiente son: los procesos de ventilación, tales como las instalaciones del ventilador, mangas de ventilación; también la infraestructura de ventilación y la correcta aplicación del software de ventilación.

Teoría de Ventilación

El aporte es mejorar el sistema de ventilación, en los aspectos de seguridad de la mina, economía de la ventilación e infraestructura del sistema. Se estudiarán las leyes que rigen el movimiento de aire en las minas para establecer el circuito de ventilación más idóneo con los costos más bajos a fin de optimizar el negocio minero, importante en las minas mecanizadas donde se emplean equipos diésel de 200, 300 y 400 HP que generan humos y gases nocivos para la salud. Básicamente un ambiente libre de

◀ ARTÍCULOS TÉCNICOS

gases, polvo y humos con temperaturas acorde con los requerimientos, generará un buen ambiente de trabajo en los tajeos, accesos, by pass, cruceros, chimeneas, galerías y subniveles aptos para el trabajo minero.

Ecuaciones básicas

Ley de Continuidad:  $Q = V \times A \times N$

Ley de Atkinson:  $P = \frac{K.C.L.Q^2.W}{A^3.1,2} = \frac{K.C.L.V^2.W}{A.1,2}$

Donde:

P = caída de presión o pérdida de presión (Pa) C = perímetro (m) L = longitud (m)  
A= área o sección de la galería, afectado del factor 0.85 o 0.9 (m<sup>2</sup>) V = velocidad (m/seg)  
Q = caudal o flujo de aire, (m<sup>3</sup>/seg)  
K = factor de fricción (Ns<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>)  
W = densidad del aire (kg/m<sup>3</sup>)  
N = numero de niveles en explotación

Considerando trabajar con “Y” de 2 salidas, 3 o 4 salidas, las áreas se duplican o triplican, reduciendo las pérdidas, reduciéndolas a 8 veces con 2 salidas y a 25 veces con 3 salidas.

Leyes de Kirchoff, caudales en el ingreso igual a caudales en las salidas.

Circuitos en Serie y Circuitos en Paralelo; los circuitos en paralelos, permiten reducir pérdidas y tener un ingreso y salida independiente.

Pérdidas por choque, por fricción, por estrangulamiento (velocidad).

Reguladores



ARTÍCULOS TÉCNICOS ▶

Leyes de los ventiladores: relación de potencia a (relación de caudales) <sup>3</sup>, HP1/HP2= Q1<sup>3</sup>/Q2<sup>3</sup>

MEJORAMIENTO DE LA VENTILACION

Ventilación en las labores mineras y su control.

El mejoramiento del sistema de ventilación, tiene por finalidad suministrar aire limpio a las labores de trabajo y evacuar los gases, humo y polvo, para mantener los gases nocivos dentro del LMP establecido por RSSO, para eliminar los accidentes por gaseamiento, a un costo óptimo de: energía, operación de ventiladores principales, secundarios y auxiliares.

El mejoramiento del sistema de ventilación, se realiza a través de:

Planeamiento de la ventilación con el minado, empleando el ventsim u otro software.

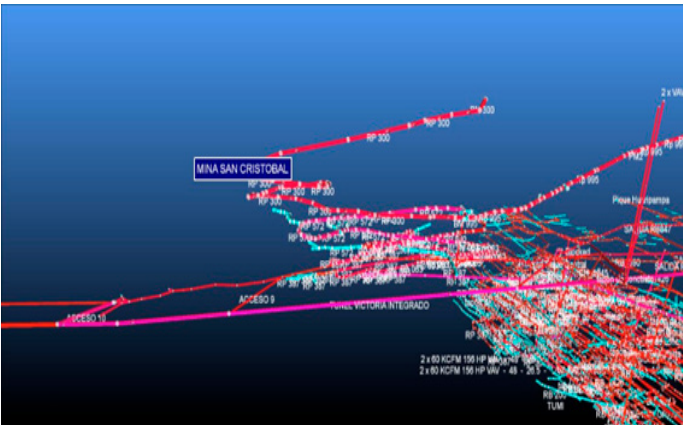


Fig 1, Isométrico de Ventilación, minas San Cristóbal, Carahuacra y Andaychagua, software Ventsim.

Fuente: Volcan Cia. Minera S.A.A., 2018

Monitoreos, para controlar la cantidad y calidad de gases presentes en las labores de trabajo, actualmente se emplean sensores.

Comunicando los valores obtenidos a los trabajadores en los paneles informativos. Con estos valores realizar actualización del balance de aire de las labores.

Empleo del VOD en las labores y monitoreo de gases conjunto, ver Anexo 2, el ahorro es de 39 \$/día, con variador de frecuencia y ventilador de 30,000 cfm, aplicando la ley de los ventiladores, de HP1/HP2= Q1<sup>3</sup>/Q2<sup>3</sup>

Mantener la infraestructura de ventilación: ventiladores (mantenimiento de aletas, bases, tapones y las conexiones eléctricas), tapones permanentes y temporales, mangas, ductos, vías y otros en perfectas condiciones.

Capacitación y entrenamiento al trabajador sobre los peligros y riesgos de los gases presentes y su control, asimismo del trabajo de los ventiladores y leyes básicas de la ventilación.

Eliminar la recirculación y emplear variadores de frecuencia como arrancadores de los ventiladores, ahorrando costos en energía, utilizando la ley de los ventiladores.

TABLA 1

Fuente: Cia. Min. Chungar S.A.C.

Maximizar los diámetros de mangas y sus equivalentes (mangas en bifurcaciones con 2, 3 o 4 salidas) y minimizar las perdidas en codos para maximizar los caudales en las labores.

Ahorros en costos de E.F. Empleando arrancadores con variador de frecuencia (V.F.)					
Costo sKwHr		0.746			
factor HPvKwHr		6			
V entilladores de 250HP					
Q1 cfm	Q2cfm	RPM1	RPM2	HP1	HP2
150000	771443	1750	900	250	34
HP total	1500				
Hr.Normales con RPM1750		17			
HP total de 6 vent. CON V. F.*			204		
Hr.cambio guardia o almuerzo		7			
Hr.totales		24			
% día con VF	0.29				
HP con V.F.	204				
S Inversión. 6V.F	160000				
retorno Inv.	02 años				
	Sin V.F.	Con VF900rpm	Con VF750rpm	AHORRRO S	
horas	24	7	17		
kw.hr	1119	152	1119		
kw mes	805680	31964	170690	8121	
S/mes	32227	1279	22828		
S/año	386726	15343	273931	97412	

\*HP1/HP2-(RPM1/RPM2)<sup>3</sup>

\*\*Q1/Q2-(RPM1/RPM2)

COSTO EQUIVALENTE ANUAL (EAC)		
C/R/H	MES	AÑO
Costo V ent.60000 cfm (\$)	70000	
Chim.100m	60000	1300000
Producción/año (ton)=P		360000
Interés (I)		0.1
Número de años (n)		1
Costo Equival.Anual (EAC)-PxL/(1-1/(1+i) <sup>n</sup> )		
EAC (\$)		143000
Costo/TON=S/TON		0.4

Fuente: elaboración propia

COSTO OPERATIVO/AÑO (COA)\$/ton	
Caida de Presión = PF (pa)	1750
Caudal (m3/seg)=	30
Eficiencia (n)=%	0.7
Cost.Elect (\$/K W - HR)= Ce	0.06
COA - P x Q x Ce x 24 x 365 /(1000 x n)	
COA=\$	39420
Costo Operativ. Anual en Vent. \$(COA)	
Producción/año=ton	360000
COSTO/TON=\$TON	0.11

Tabla 2 Costos de ventilación en un tajeo por corte y relleno Hidráulico ascendente (C/R/H)

◀ ARTÍCULOS TÉCNICOS

CONCLUSIONES

1. La aplicación del Mejoramiento del Sistema de Ventilación propuesto reducirá a cero los accidentes por gaseamiento.
2. El empleo de arrancadores con variador de frecuencia (VF) permite variar la velocidad de los ventiladores (RPM) y proporcionar el caudal de aire en función al requerimiento de los trabajadores en el ciclo de minado (perforación, disparo, desatado, sostenimiento, limpieza). De acuerdo a la tabla 1 pág. 7, el costo/año de 6 ventiladores de 150,000 cfm cada uno es \$386,726 sin VF y el costo/ año empleando VF es \$97,452 obteniendo un ahorro de 75%; por lo tanto se contará con más caudal de aire para las labores críticas, proporcionando el ambiente adecuado para el desarrollo de la producción de minerales, considerando que gases nocivos para la salud, estén por debajo del LMP, tales como el monóxido de carbono (CO), con límite máximo permisible (LMP) de 25 ppm, indicado por el RSSO.
3. El empleo de variadores de frecuencia en vez de arrancadores delta estrella, permitirá el ahorro en energía eléctrica, logrando ahorrar \$97,452 en 6 ventiladores, cumpliendo con la ley de los ventiladores, HP1/HP2=(RPM1/RPM2)<sup>3</sup> ver Tabla 1, pág. 7
4. El sostenimiento más común en la minería mecanizada es shotcrete, el caudal de aire requerido, es de 33,074 cfm con mangas de 42" de diámetro o su equivalente en área. Los monitoreos permanentes de la



calidad y cantidad de aire son necesarios para garantizar que el aire respirable esté dentro de los LMP; así mismo el control de gases emitidos por los equipos diésel, según el RSSO.

5. Los costos de ventilación por método de explotación son:

Cámaras y Pilares	0.08
\$/ton.	
Shirinkage	0.23
\$/ton.	
Corte y relleno hidráulico (ascendente)	0.11
\$/ton. Ver tabla 2	
Corte y Relleno Descendente	0.11
\$/ton.	
Cuadros	0.23
\$/ton.	

El más económico es el costo de ventilación en la explotación por cámaras y pilares porque puede mover mayor volumen de mineral.

6. Los monitoreos permanentes de velocidad de aire que proporcionan la cantidad de aire son necesarios para garantizar el aire requerido por el personal, el cual debe estar dentro de los LMP que indica el RSSO, previniendo los accidentes por gaseamiento (la velocidad mínima de aire es de 20 metros/minuto al emplear dinamitas y 25 metros/minuto al emplear ANFO).

7. El costo anual perdido por falta de hermetizar 01 ventilador de 120,000 cfm, considerando una abertura de 0.2 m² es de \$7,674

RECOMENDACIONES

- Es importante realizar inspecciones semanales de los circuitos de ventilación principal para detectar oportunidades de mejora.
- Las labores abandonadas o paralizadas temporalmente deben ser clausuradas con estructuras sólidas, como tapones de bloquetas o concreto para evitar el ingreso de personal y flujo de aire que podrían generar accidentes por gaseamiento y pérdidas de caudal y presión. Los accidentes mortales por gaseamiento en las minas Retamas y Mallay de los años 2015 y 2016 fueron por falta de tapones en labores paralizadas.
- El mantenimiento de ventiladores y arrancadores debe contar con su programa mensual respectivo, para limpiar alabes que contengan carbón y polvo de minerales, para cambiar mallas de ingreso deterioradas por los vapores ácidos y cambiar o limpiar partes eléctricas de los arrancadores que se deterioran con el aire viciado. También es importante el monitoreo de la vibración del ventilador para prevenir daños severos del mismo, debiendo estar por debajo de 5.5 mm/seg.
- El cumplimiento de mantenimiento preventivo de equipos diésel debe ser estricto.
- Los tapones de los ventiladores, deben estar hermetizados completamente, empleando materiales de construcción permanente como son ladrillos y concreto;

anclado a las cajas, para evitar pérdidas de energía.

6. Es importante la auditoría del sistema de ventilación de la mina por expertos para detectar oportunidades de mejora.

7. Se debe calibrar el modelo y las condiciones de la mina para generar simulaciones reales. Ver figura 1, pág. 6, Isométrico de Ventilación, minas San Cristóbal, Carahuacra y Andaychagua, software Ventsim.

8. Las mangas de ventilación deben ser del mayor diámetro posible, para minimizar las pérdidas por fricción e inyectar el caudal requerido en el frente de la galería o tajeo, en caso necesario se debe instalar 2 ("Y"), 3 o 4 mangas paralelas que logran llevar la mayor cantidad de aire fresco al frente de la labor. Las aberturas de la manga por rozamiento o deterioros deben ser inmediatamente reparados, para evitar pérdidas de energía.

ANEXO 1

ACCIDENTES EN MINAS DE LA GRAN Y MEDIANA MINERIA

En el presente año de 17 accidentes mortales, 5 son de ventilación, es el 30% y la tendencia está en alza.

**CAUSAS:** Incumplimiento o falta de: procedimientos, lperc, señalizaciones, tapones de labores abandonadas, monitoreo de labores, caudal de aire en labores, planeamiento, monitoreo, PETS, IPERC, capacitación de personal, chimeneas de ventilación, mangas de ventilación, cobertura.

Mayor profundidad de minas, mayores distancias horizontales a los accesos de aire fresco.

Empleo de equipos diésel de gran capacidad.

SOLUCION: Aumentar las fiscalizaciones, los estudios de ventilación deben ser con antigüedad máxima de 1 año, los tajeos y labores son dinámicos, cumplimiento del planeamiento, comprobar la ventilación de las profundizaciones, capacitación diaria, emplear software en planeamiento y actualizarlos, cumplir el estándar de tapones, monitoreo de calidad y cantidad en labores.

ACCIDENTES EN VENTILACION

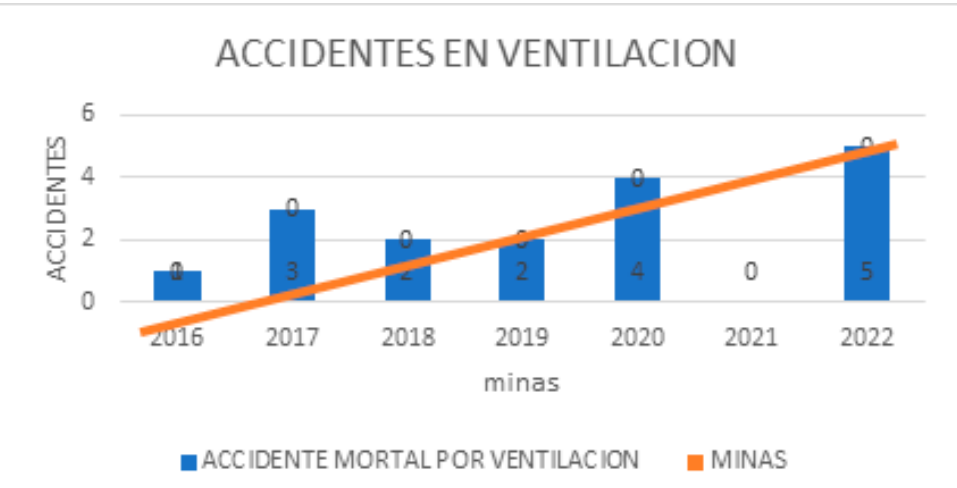
Fuente: MINEM

Años	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
ACCIDENTE MORTAL POR VENTILACIÓN	1	3	2	2	4	0	5
MINAS	MALLAY	SANTA LUISA (2), Arcata (2)	SAN JUAN DE AREQUIPA AMERICANA	COBRIZA, LAS AGUILAS	YAUICOCHA (2) RACRAC(2)		MILPO (2), HUARCN, KOLPA, PARCOY

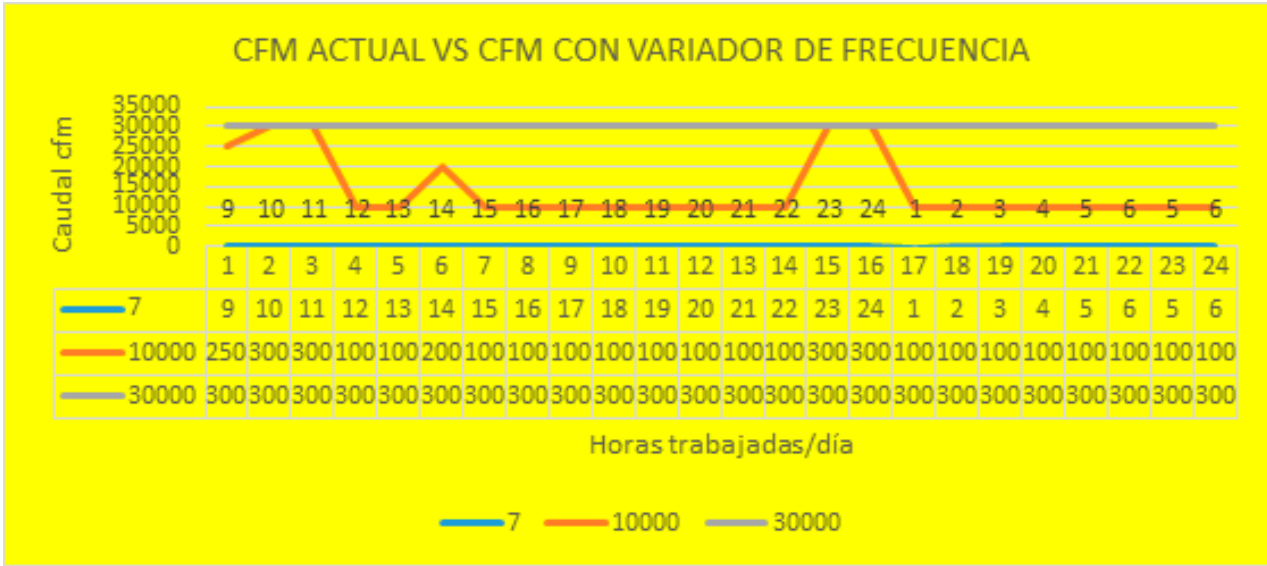


GRAFICO Y TENDENCIA  
ANEXO 2: APLICACIÓN DEL VOD

	Horario de trabajo VS Aire necesario para cubrir la demanda (VOD)								Ventilación Bajo Demanda									
	Ingreso a la labor	des-atado de rocas	des-atado de rocas	limpieza de mineral	limpieza de mineral	al-muer-zo	al-muer-zo	sosten-miento	sosten-miento	perforación	perforación	perforación disparo	salida	ingreso a la labor	desa-tado de rocas	des-atado de rocas	lim-pieza mineral	limpieza mineral
HORARIO DE TRABAJO/DÍA	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
CFMREAL	10000	20000	25000	30000	30000	10000	10000	20000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	30000	30000
CFM ACTUAL	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000



Horario de trabajo vs aire necesario para cubrir la demanda (VOD), (ventilación bajo demanda) y ahorros en energía con el empleo de Variadores de Frecuencia.



# SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE PLANES MINEROS

Jorge Lozano  
*Escuela Profesional de Ingeniería de Minas- UNI*

## 1 INTRODUCCIÓN

La estimación de la flota de camiones necesario para cumplir con el plan de producción es una de las tareas más importantes en la planificación de minas a tajo abierto debido a que el material que se explota de la mina debe ser transportado a los diferentes destinos al menor costo posible y con los mayores estándares de seguridad.

La estimación de la flota deriva en costos de capital que la empresa minera debe realizar con el fin de cumplir con sus objetivos de producción por lo que se evidencia la vital importancia de su correcta estimación.

Las metodologías tradicionales con las que se realiza la estimación de camiones lo realizan sin tener en cuenta una base matemática adecuada y utilizando parámetros operativos constantes lo que implica que los resultados no tengan sustento matemático de ser la mejor estimación.

Dado lo anterior en este documento mostraremos y desarrollaremos un modelo matemático que representará el comportamiento dinámico de un sistema de transporte obteniendo la ecuación fundamental de los sistemas dinámicos mineros. Asimismo, validaremos los resultados matemáticos con la construcción de

dos modelos de simulación.

## 2 OBJETIVOS

Plantear la base científica de la estimación de camiones en una mina a tajo abierto mediante el desarrollo de un modelo matemático y su respectiva demostración basado en el comportamiento real de los sistemas de dinámicos.

Extender el conocimiento de la estimación de flota de camiones de la actual metodología determinística la cual considera la formula tradicional de Match Factor patentada por Morgan y Peterson en 1968 a la sugerida por el autor donde se incluye la dinámica de los sistemas reales y donde la espera de las palas (servidores) modifica el comportamiento y la estimación de la flota de acarreo.

Entender a mayor profundidad el comportamiento económico de un sistema dinámico mediante la integración de un modelo matemático y un modelo de simulación donde se demostrará que los datos obtenidos en un modelo de simulación y que representa una realidad esperada son gobernadas por el formulismo matemático

## 3 FUNDAMENTO



La capacidad de predecir con exactitud la productividad de una flota de camiones y palas es un problema importante para la minería y la construcción, y está intrínsecamente vinculada a la selección del equipo. En particular nos interesa "la predicción de los tiempos de viaje de ida y vuelta de un ciclo de camión y la predicción del efecto de la interacción entre la pala y camión en el punto de carga"

En este contexto se desarrollaron varias teorías que buscan interpretar en forma analítica dicho problema. Tenemos así la teoría del factor de coincidencia (match factor), la teoría de agrupamiento (Bunching theory) y la teoría de colas (queue theory).

La revisión de la literatura incluye los conceptos definidos por Morgan y Paterson en 1968 y la ampliación de los conceptos para flotas heterogéneas planteados por Christina Naomi Burt en su disertación de tesis doctoral.

Los estudios desarrollados con anterioridad a este documento que forma parte de mi tesis de grado consideran modelos donde los tiempos de cola originados en las palas son fijos o son incluidos dentro del tiempo total de acarreo lo que no permite relacionar correctamente el comportamiento real del sistema con el modelo matemático y por ende cualquier modelo de simulación ya sea discreto o estocástico no se valida con la teoría matemática.

3.1 Modelo Matemático

Se imagina un sistema pala-camión donde se tienen las fases de minado y los destinos de descarga. Entonces, se puede considerar que

existen m palas y n camiones en el sistema. Las m palas están asignadas a diferentes fases de minado y su objetivo es cumplir una cuota de producción K donde la producción P(m) siempre tiene que ser mayor o igual a K(m).

Aquí el cuestionamiento es: ¿cuántos camiones se necesitan? Se puede estimar con la fórmula de Match Factor considerando un MF de 1. Pero se obviaría la naturaleza del sistema de acarreo, es decir, su comportamiento económico.

Si un sistema empieza a operar y no tiene camiones, tendrá un alto costo de minado debido a que no tiene producción. Pero a medida que ingresen camiones al sistema, el tiempo de espera en las palas disminuye, aumentando así su productividad y disminuyendo el costo de minado. Esto es lógico, pero ¿hasta qué punto? La respuesta nos brindará un estudio del comportamiento de las colas y esperas en las palas.

3.1.1 Funciones de esperas y cola

Para entender el comportamiento económico del sistema en función de las colas y las esperas, hay que imaginar la función WSh(n), que representa la cantidad de horas de espera de las palas en función de los camiones. Esta decrece en función del ingreso de camiones. Por otro lado, dado por la naturaleza de los servidores siempre existe cola en un sistema; no siempre es malo tener cola. En principio cuando no hay camiones, no hay colas, en teoría, pero al incrementarse la cantidad de camiones, existe la posibilidad de un incremento en las colas. Este incremento está gobernado por la función QSh(n). Esta posibilidad de existencia

se demostrará al determinar la relación de esperas y colas.

De las dos funciones WSh(n) y QSh(n), la que tiene un impacto significativo es la espera de las palas. Sea P(n) el tonelaje minado y que representa la producción de la mina para n camiones en operación. Entonces, se define esta función como sigue:

$$P_n = \sum_{i=1}^m \left( \frac{H_i f c}{t c_i + t s_i + t e_i} \right) \quad (3.1)$$

Donde:

- H\_i: tiempo nominal de operación de la Pala i
- t c\_i: tiempo promedio de carguío de la Pala i.
- t s\_i: tiempo promedio de cuadrado de los camiones en la Pala i.
- t e\_i: tiempo promedio de espera de la Pala i.
- f c: factor de carga de los camiones.

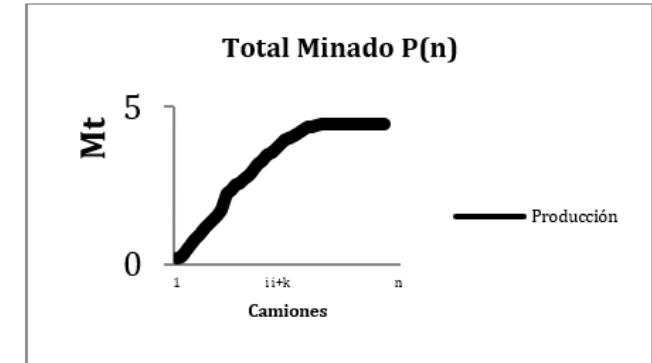


Figura 3-1: Total Minad

De la ecuación 3.1, se puede ver que el tiempo promedio de espera tei de la pala i es inversamente proporcional a la producción, lo que sustenta que un incremento en la flota de camiones disminuye las demoras e incrementa la producción. Si queremos calcular el límite de P(n) cuando n tiende a

ser muy grande, el resultado es que la P(n) es acotada, es decir, tiene un máximo teórico, que es igual a

$$\sum_{i=1}^m \left( \frac{H_i f c}{t c_i + t s_i} \right)$$
 Esto se puede ver en forma gráfica en la figura 3-1.

Para un sistema de una sola pala y un solo destino, como se verá más adelante, es factible llegar a esta producción; pero en un sistema de m palas y múltiples destinos solo es un límite máximo dado que la interacción de múltiples variables agrega un tiempo de demora adicional que es la congestión. Como se comentó en los párrafos anteriores, la espera en la pala determina la producción en la mina.

Dado este resultado de dependencia entre P(n) y WSh(n), se determinará la función WSh(n), que vendría dada por la suma de todas las esperas de las palas. Se representa como sigue:

$$WSh_n = \sum_{i=1}^m \frac{H_i t e_i}{t c_i + t s_i + t e_i} \quad (3.2)$$

Lo importante de esta función es que nos brinda una relación con la producción P(n) de la mina, pero aún no se sabe su relación con las colas. Para demostrar dicha relación, se define lo siguiente:

El tiempo nominal de operación de una pala es igual al tiempo total de operación más el tiempo de espera. Entonces, según esto, se define la siguiente ecuación:



$$H_i = E_i + (tc_i + ts_i)\#_i \quad (3.3)$$

Donde  $\#_i$  es el número de ciclos de la pala  $i$  en el tiempo  $H_i$ . De esta ecuación, se encuentra el número de ciclos despejando la ecuación 3.3:

$$\#_i = \frac{H_i - E_i}{tc_i + ts_i} \quad (3.4)$$

Entonces, dado que el número de ciclos  $\#_i$  ha ocurrido en el tiempo  $H_i$ , entonces la tasa de servicio por hora para las  $m$  palas está dada por la siguiente ecuación:

$$s_m = m \frac{\sum_i \frac{H_i - E_i}{tc_i + ts_i}}{\sum_i H_i} \quad (3.5)$$

De igual forma, se estima la tasa de llegadas de los camiones a las palas. Se empieza por definir a  $tq_j$  como el tiempo nominal de acarreo, es decir, el tiempo que se demora un camión  $j$  en ser cargado en una pala  $i$ : tiempo de acarrear, cargar, cuadrar, descargar y retornar vacío. Este tiempo es el que se puede estimar usando la topografía de la mina y las curvas rimpull del fabricante del camión. Por otro lado, se define a  $tq_j$  como el tiempo de cola. Entonces, el tiempo de ciclo de acarreo  $tcc_j$  se determina de la siguiente manera:

$$tcc_j = tn_j + tq_j \quad (3.6)$$

La fórmula 3.6 muestra el tiempo de ciclo real debido al efecto de la cola para un camión  $j$  en una ruta en particular. Si este camión  $j$  da  $k_j$  ciclos en un tiempo de operación  $H_j$ , entonces, se determinan las siguientes ecuaciones:

$$\sum_{k_j=1}^{k_j} tcc_{jk_j} = \sum_{k_j=1}^{k_j} tn_{jk_j} + \sum_{k_j=1}^{k_j} tq_{jk_j} = H_j \quad (3.7)$$

Generalizando la ecuación 3.7 para  $n$  camiones, en la operación se tiene la siguiente ecuación:

$$\sum_{j=1}^n H_j = \sum_{j=1}^n \sum_{k_j=1}^{k_j} tn_{jk_j} + \sum_{j=1}^n \sum_{k_j=1}^{k_j} tq_{jk_j} \quad (3.8)$$

Pero, para una ruta en particular, el tiempo nominal de acarreo no cambia. Entonces, la ecuación 3.8 se simplifica y obtenemos la siguiente fórmula:

$$\sum_{j=1}^n H_j = \sum_{j=1}^n k_j tn_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k_j=1}^{k_j} tq_{jk_j} \quad (3.9)$$

De la ecuación 3.9, el componente  $\sum_{(j=1)^{nk_j}} tn_j$ , que es el tiempo nominal total, puede ser expresado de esta manera:

$$\sum_{j=1}^n k_j tn_j = \bar{tx}_{-q} \sum_{j=1}^n k_j = \bar{tx}_{-q} K \quad (4.0)$$

Donde  $(tx)_{-q}$  es el tiempo nominal de acarreo promedio del sistema y  $K$  es el número de ciclos de acarreo del mismo. Este tiempo promedio no incluye al tiempo de cola. Ahora, de las ecuaciones 3.9 y 4.0 se determina el número de ciclos, que se expresa de la siguiente manera:

$$K = \frac{\sum_{j=1}^n H_j - \sum_{j=1}^n \sum_{k_j=1}^{k_j} tq_{jk_j}}{\bar{tx}_{-q}} \quad (4.1)$$

De la ecuación 4.1, se conoce el número de ciclos del sistema ocurridos en  $\sum_{(j=1)^n} H_j$  horas operativas del sistema. Entonces, se determina el número de ciclos por hora que llegan a las palas. Esto queda determinado así:

$$a_n = n \frac{\left( \sum_{j=1}^n H_j - \sum_{j=1}^n \sum_{k_j=1}^{k_j} tq_{jk_j} \right)}{\bar{tx}_{-q} \sum_{j=1}^n H_j} = \frac{n \left( 1 - \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{k_j=1}^{k_j} tq_{jk_j}}{\sum_{j=1}^n H_j} \right)}{\bar{tx}_{-q}} = n \left( \frac{1 - Q_n}{\bar{tx}_{-q}} \right) \quad (4.2)$$

Por último, si se considera un sistema de palas y camiones homogéneos, la ecuación 3.5 se convierte en lo siguiente:

$$s_m = m \frac{\sum_i \frac{H_i - E_i}{tc_i + ts_i}}{\sum_i H_i} = \frac{m(\sum_{i=1}^m H_i - \sum_{i=1}^m E_i)}{(tc_i + ts_i) \sum_i H_i} = \frac{m \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^m E_i}{\sum_i H_i} \right)}{tc_i + ts_i} = \frac{m(1 - E_m)}{tc_i + ts_i} \quad (4.3)$$

Con las ecuaciones 4.2 y 4.3, para un sistema de camiones y palas homogéneos, se puede decir que la tasa de llegadas de  $n$  camiones a  $m$  palas es equivalente a las ecuaciones 4.2 y 4.3. Por lo tanto, se plantea la siguiente ecuación:

$$n \left( \frac{1 - Q_n}{\bar{tx}_{-q}} \right) = \frac{m(1 - E_m)}{tc_i + ts_i} \quad (4.4)$$

Esta equivalencia lleva a replantear el  $MF_{nm}$  del sistema. Entonces, la siguiente ecuación, que es el cociente entre la tasa de llegada de camiones y la tasa de servicio de las palas, se presenta de esta manera:

$$MF_{nm} = \frac{n(tc_i + ts_i)}{m\bar{tx}_q} \quad (4.5)$$

Ahora, con el resultado de la ecuación 4.4, la 4.6, que representa el MF en función del porcentaje de esperas, colas y el tiempo de acarreo promedio con cola y sin cola, queda definida de este modo:

$$MF_{nm} = \frac{n(tc_i + ts_i)}{m\bar{tx}_q} = \left( \frac{(1 - E_m)}{(1 - Q_n)} \right) \left( \frac{\bar{tx}_{-q}}{\bar{tx}_q} \right) \quad (4.6)$$

También se sabe que se cumple la siguiente relación, dado que en toda la operación se han presentado  $K$  ciclos:

$$k\bar{tx}_q = k\bar{tx}_{-q} + k\bar{q} \quad (4.7)$$

Además, se sabe que el tiempo promedio de acarreo, incluyendo las colas, multiplicado por el número de ciclos equivale a las horas totales de operación. Así, se puede convertir la ecuación 4.7 en la siguiente expresión:



$$\sum_{i=1}^n H_i = \frac{\bar{t}x_{-q}}{\bar{t}x_q} \sum_{i=1}^n H_i + \sum_{j=1}^n \sum_{k_j=1}^{k_j} t q_{jk_j} \quad (4.8)$$

Despejando el cociente de tiempos de acarreo promedio de la ecuación 4.8 se presenta:

$$\frac{\bar{t}x_{-q}}{\bar{t}x_q} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i - \sum_{j=1}^n \sum_{k_j=1}^{k_j} t q_{jk_j}}{\sum_{i=1}^n H_i} = 1 - Q_n \quad (4.9)$$

Aplicando el resultado de la ecuación 4.9 a la ecuación 4.6, se tiene la fórmula final del Match Factor:

$$MF_{nm} = \frac{n(tc_i + ts_i)}{m\bar{t}x_q} = \left( \frac{(1 - E_m)}{(1 - Q_n)} \right) \left( \frac{\bar{t}x_{-q}}{\bar{t}x_q} \right) = 1 - E_m \quad (5.0)$$

La ecuación 5.0, que es el Match Factor como se definió en el capítulo anteriormente, brinda la posibilidad de evaluar la productividad de la mina; es decir, si el MF es menor que 1 significa que el sistema tiene un déficit de camiones, y si es mayor significa que hay exceso de camiones. En consecuencia, el objetivo es encontrar el punto de equilibrio, cuando el MF es igual a 1.

Ahora, se despeja la espera en función de la cola de la ecuación 5.0, que se expresa como sigue:

$$E_m = 1 - \frac{n(tc_i + ts_i)(1 - Q_n)}{m\bar{t}x_{-q}} \quad (5.1)$$

De acuerdo con la ecuación 5.1 y la condición de equilibrio del MF, un sistema está en equilibrio cuando el MF es igual a 1. Entonces, existe en este punto un número de camiones  $n_0$  de tal manera que no hay

déficit ni exceso de camiones. Dicho de otra manera, la tasa de servicio de las palas es igual a la tasa de llegadas de los camiones y estrictamente la espera es igual a cero, como se puede comprobar en la ecuación 5.0. Este  $n_0$  se puede calcular así:

$$n_0 = \frac{m\bar{t}x_{-q}}{(1 - Q_{n_0})(tc_i + ts_i)} \quad (5.2)$$

Para un sistema de palas y camiones heterogéneos estas fórmulas no aplican directamente, pero se puede llegar a una relación similar planteando las ecuaciones respectivas. Para el caso de estudio se partirá del caso de sistemas de palas y camiones homogéneos. Se vio en la ecuación 5.0 la estrecha relación entre las colas de los camiones en las palas, la espera de estas, el número de camiones, el tiempo de servicio de las aquellas y el tiempo promedio de acarreo, y cómo estos parámetros definen la productividad de un sistema. Esta productividad encuentra su máxima expresión cuando el MF es igual a 1, cuando se encuentra el punto de equilibrio del sistema. Esto último equivale a encontrar el número de camiones óptimo, es decir  $n_0$ .

Si se presta atención a la ecuación 5.0, donde se expresa el MF, se verá que depende del porcentaje de cola del sistema, del porcentaje de espera del mismo, del número de camiones y de los tiempos de servicio de pala y de acarreo de camiones. Entonces, es posible que exista más de un MF igual a

1, es decir, está dentro de las posibilidades que dos o más flotas de camiones presenten ese valor, dado que depende no solo de los camiones, sino también de las rutas de los destinos. Y no necesariamente existe una solución. Puede ser que para  $n_0$  el MF sea 1 pero también es posible para un  $n_0'$  dado que depende del comportamiento de las colas y esperas.

Por esta razón, se necesita utilizar una ecuación diferente, pero que está íntimamente relacionada al MF: el costo unitario de minado,  $umc_n$ .

### 3.1.2 Función Costo de minado

El costo de minado  $MC(n)$  está definido por la siguiente ecuación:

$$MC_n = \sum_{i=1}^m Ch_i H_i + \sum_{j=1}^n Ch_j H_j + GA_{mn} \quad (5.3)$$

Donde  $Ch_i$  es el costo unitario de una pala  $i$  y  $Ch_j$  es el costo unitario de un camión  $j$ . Además,  $GA$  son los costos adicionales como perforación y voladura.

La ecuación 5.3 resume el costo de carguío, acarreo y otros que la operación asume para mover el total de producción. La componente del costo de carguío es una función constante dado que representa el costo de operar las  $m$  palas en el sistema, mientras que el costo de acarreo del sistema representa una función creciente debido al incremento de camiones.

Podemos ver gráficamente este comportamiento en la figura 3-2:

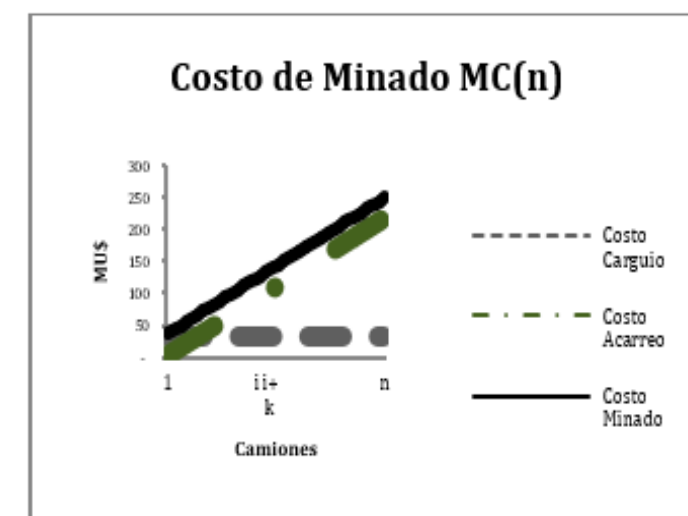


Figura 3 2: Costo de Minado

Para estimar el costo unitario de minado es necesario determinar la producción, que se muestra en la siguiente ecuación:

$$P_n = \frac{fc(1 - E_m)}{tc_i + ts_i} \sum_{i=1}^m H_i \quad (5.4)$$

La producción  $P_n$  tiene un máximo, que para un sistema homogéneo equivale a  $fc / (tc_i + ts_i) \sum_{i=1}^m H_i$ . Teniendo en cuenta este resultado y las ecuaciones 5.0 y 5.1, se obtiene el costo unitario de minado que se expresa en la ecuación 5.5.

$$umc_n = \frac{\sum_{i=1}^m Ch_i H_i + \sum_{j=1}^n Ch_j H_j + GA_{mn}}{\frac{fc(1 - E_m)}{tc_i + ts_i} \sum_{i=1}^m H_i} \quad (5.5)$$

sabe que el denominador de la función  $umc_n$  tiene un máximo, entonces pasado este punto cualquier incremento en camiones solo produciría lo mismo en costo unitario de minado. También se sabe que bajo



este máximo tendremos un incremento del costo unitario de minado. Por eso, se está ante un punto mínimo de la función  $umc_n$ . Dadas estas consideraciones, se representa la función  $umc_n$  de forma gráfica en la figura 3-3.

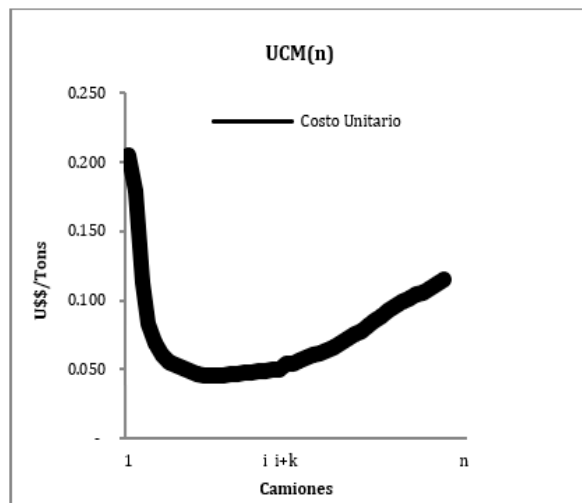


Figura 3 3: Costo Unitario de Minado

En la figura 3-3, se ve cómo es la función del costo unitario de minado. Esta función se construye a partir de la ecuación 5.5. Cuando la cantidad de camiones tiende a cero, el costo de operación unitario es muy alto debido a las altas esperas de las palas y la poca producción. A medida que los camiones ingresan al sistema, la producción se incrementa y el costo unitario de minado se reduce hasta cierto punto, dado que por más que se incremente la cantidad de camiones, la producción de las palas ha llegado a su límite máximo. Es decir, que las esperas son las mínimas posibles y el incremento marginal del costo de minado es producido porque las colas de los camiones en el sistema empiezan a incrementarse. Existe, entonces, una longitud de cola

aceptable que origina un incremento marginal de producción y a partir de dicho punto cualquier incremento de camiones no agrega valor al sistema. Así, el problema se reduce a encontrar el punto de equilibrio de la operación (número de camiones), donde el costo unitario de minado es el mínimo.

Se ha visto que para encontrar el costo unitario mínimo de minado se debe encontrar la cota máxima de producción factible, que matemáticamente es igual a  $fc / (\sum_{i=1}^m H_i + \sum_{i=1}^n H_i)$ . La ecuación 5.2 brinda la cantidad de camiones óptimo para lograr un MF igual a 1, pero expresa que depende de una espera y cola asociadas.

Entonces podemos afirmar que dado un sistema de  $m$  palas y  $n$  camiones, la producción máxima ocurre para un  $n_0$  y en este punto existe un mínimo costo unitario de minado y que es igual a:

$$umc_{n_0} = \frac{\sum_{i=1}^m Ch_i H_i + \sum_{j=1}^{n_0} Ch_j H_j + GA_{mn_0}}{\frac{fc}{tc_i + ts_i} \sum_{i=1}^m H_i} \quad (5.6)$$

De todo lo anterior se concluye que para un número de camiones  $n_0$  se encuentra la máxima producción y la cota mínima del costo de minado unitario. Entonces, este  $n_0$  es la cantidad de camiones óptimo que hace que el sistema trabaje a su máxima productividad; este  $n_0$  ocurre cuando el  $MF_{nm}$  es igual a 1. Esto se puede expresar matemáticamente de la siguiente manera:

$$\forall S(m, n, r(x, y, z), d), \exists n_0 \setminus P_{n_0} \\ = \max_n P_n \cap umc_{n_0} = \min_n umc_n \\ \rightarrow MF_{n_0 m} = 1 \quad (5.7)$$

Donde  $S(m, n, r(x, y, z), d)$  es un sistema de acarreo de  $m$  palas,  $n$  camiones,  $r$  rutas de acarreo y  $d$  destinos.

### 3.1.3 Función objetivo

En la sección anterior se presentó las relaciones entre la cola y espera de un sistema y cómo determinar los camiones encontrando el mínimo de la función costo unitario de minado o buscando el Match Factor igual a 1. Esto daría la máxima producción posible, pero no necesariamente es lo que un plan de largo plazo requiere.

Sea  $K_w$  la producción requerida para el periodo  $w$ , donde  $w \in T[1, x] \times N$ . Entonces, para cumplir con la producción planeada se debe cumplir la relación siguiente:

$$P_{n_{0w}} = K_w, \forall w \in T \quad (5.8)$$

La ecuación 5.8 es la condición fundamental para calcular el verdadero número de camiones  $n_{0w}$  requeridos en un periodo dado  $w$ .

### 3.1.4 Balance de fases de producción

Ahora se sabe que existe una condición global que se debe lograr y que es la que maximizará el Valor Presente Neto de la empresa minera, pero adicionalmente existe una restricción de la producción por fase de minado. Esto quiere decir que, periodo a periodo, cada fase debe cumplir con una cuota de producción, y que no necesariamente es la máxima. En ciertas fases se requiere mayor producción que en otras; por lo tanto, la producción para ciertas palas del sistema de acarreo no

siempre será la máxima.

Entonces, adicionalmente a la condición fundamental, es necesario cumplir objetivos por pala. Así, se tiene:

La ecuación 5.9 muestra que para cada pala en cada periodo se debe cumplir con

$$P_{n_{0wm}} = Z_{wm} \forall w \in T \quad (5.9)$$

un objetivo preestablecido. Ahora, se puede plantear la ecuación general del cálculo de camiones, que es como sigue:

No se puede resolver este sistema de ecuaciones con métodos determinísticos

$$P_n = K_w, \forall w \in T \\ \text{Sujeto a:} \\ P_{n_{0wm}} = Z_{wm} \forall w \in T, \forall m \\ K_w = \sum_{m=1}^m Z_{wm}$$

dado que la naturaleza de las colas y las esperas son resultado del comportamiento probabilístico de un sistema de acarreo y de un proceso de simulación. Para poder aplicar, entonces, toda la teoría desarrollada se debe construir un sistema de simulación y sobre sus resultados aplicar los conceptos estudiados y determinar la flota óptima, sustentado todo en las matemáticas desarrolladas en este documento.

## 4 MODELO DE SIMULACIÓN

En este capítulo se mostrará la aplicación de la teoría desarrollada para estimar el punto óptimo de un sistema productivo



y los camiones necesarios para cumplir un plan de producción. También se verá el comportamiento de un sistema de una sola pala y un solo destino de descarga, y un sistema complejo de múltiples palas y múltiples destinos.

4.1 Caso 1: Sistema de una pala y un solo destino de descarga

Este sistema comprende un caso básico de un sistema productivo, donde existe una sola pala y un solo destino de descarga.

4.1.1 Elementos del Sistema

Este sistema cuenta con una pala y un destino. El tiempo promedio de carguío es de 1.5 minutos y el tiempo de cuadrado del volquete es de 0.5 minutos. El material cargado es enviado a la chancadora, donde el tiempo de cuadrado es de 1 minuto y el tiempo de descarga es de 1.2 minutos. El tiempo de acarreo de un camión vacío es de 4.3 minutos y de un camión cargado es de

11 minutos.

Entonces, el cuestionamiento surge: ¿cuántos camiones necesitamos para cumplir con la máxima producción del sistema? ¿Existe cola en el sistema?

Para responder a estas preguntas y a otras, como el porcentaje de espera de la pala y la chancadora, se construirá un sistema de simulación en GPSS. El código fuente de este sistema se puede revisar y testear en el Anexo 1.

4.1.2 Resultados de la simulación

En la figura 5.1 mostramos los resultados de la simulación. Como se puede ver podemos estimar la cantidad de material minado, el número de ciclos, el tiempo de cola de los camiones y espera de las palas y la Chancadora. Como podemos observar también hemos calculado el Match Factor y con ello hemos demostrado la ecuación 5.0 usando la simulación con GPSS.

Simulación de Sistemas Mineros : Caso Base										
# de Corrida	#	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Camiones	Unidades	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Tons Crusher	Tonnes	786,768	1,049,034	1,311,132	1,573,240	1,835,348	2,098,456	2,361,564	2,624,672	2,887,780
Tons Shovel	Tonnes	786,916	1,049,172	1,311,428	1,573,584	1,835,692	2,098,800	2,361,908	2,625,016	2,888,124
Incremental Tons			262,236	262,236	262,236	262,236	262,236	262,236	262,236	262,236
Disponibilidad	%	91%	91%	91%	91%	91%	91%	91%	91%	91%
Utilización	%	87%	87%	87%	87%	87%	87%	87%	87%	87%
Horas operativas	Hrs	595	595	595	595	595	595	595	595	595
Ciclos	Unid	5,317	7,989	8,861	10,633	12,405	13,781	13,782	13,783	13,783
Utilización Pala	%	39%	51%	64%	77%	90%	100%	100%	100%	100%
Utilización Chancadora	%	32%	43%	54%	63%	75%	84%	84%	84%	84%
Tiempo de Cola camiones	seg/ciclo	0.09	0.132	0.175	0.219	0.268	35.096	190.482	345.857	501.21
Tiempo de espera Palas	min/ciclo	4.12	1.88	1.44	0.77	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00
Tiempo de carguío + Cuadrado	seg/ciclo	155.4	155.4	155.4	155.4	155.4	155.4	155.4	155.4	155.4
Tiempo de descarga + Cuadrado	seg/ciclo	130	130	130	130	130	130	130	130	130
Tiempo acarreo vacío	seg/ciclo	263	263	263	263	263	263	263	263	263
Tiempo acarreo lleno	seg/ciclo	660	660	660	660	660	660	660	660	660
Ciclo de acarreo incluido colas	min/ciclo	20.14	20.14	20.14	20.14	20.14	20.72	23.31	25.90	28.49
Ciclo de carguío	min/ciclo	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59
% Espera Pala	%	61%	42%	36%	23%	10%	0%	0%	0%	0%
% Cobertura Pala	%	39%	58%	64%	77%	90%	100%	100%	100%	100%
% Cola de Volquetes	%	0.02%	0.01%	0.01%	0.02%	0.02%	2.82%	13.62%	22.26%	29.33%

Match Factor= n*(tcrts)/m*q	%	39%	51%	64%	77%	90%	100%	100%	100%	100%
Match Factor= (1-%E)*tcr/(q/(1-%Q)*q)	%	39%	58%	64%	77%	90%	100%	100%	100%	100%
Match Factor= 1-%E	%	39%	58%	64%	77%	90%	100%	100%	100%	100%
Productividad Pala	Ton/Hr	1,323	1,764	2,205	2,645	3,086	3,429	3,429	3,429	3,429
Productividad Mina	Ton/Hr	441	441	440.91	441	441	429	381	343	312

Costo Acarreo	\$/hr	221	221	221	221	221	221	221	221	221
Costo Carguío	\$/hr	560	560	560	560	560	560	560	560	560
Costo Acarreo	\$/tn	0.301	0.301	0.301	0.301	0.301	0.35	0.380	0.645	0.709
Costo Carguío	\$/tn	0.42	0.32	0.25	0.21	0.18	0.35	0.16	0.16	0.35
Costo Total Unitario	\$/tn	0.92	0.82	0.76	0.71	0.68	0.68	0.74	0.81	0.87

Figura 4 1: Plantilla de resultados- Análisis económico

Cuando se construye el sistema y se simula para diferentes escenarios de camiones, se pueden encontrar los siguientes resultados que se comentarán y evaluarán en las siguientes figuras:

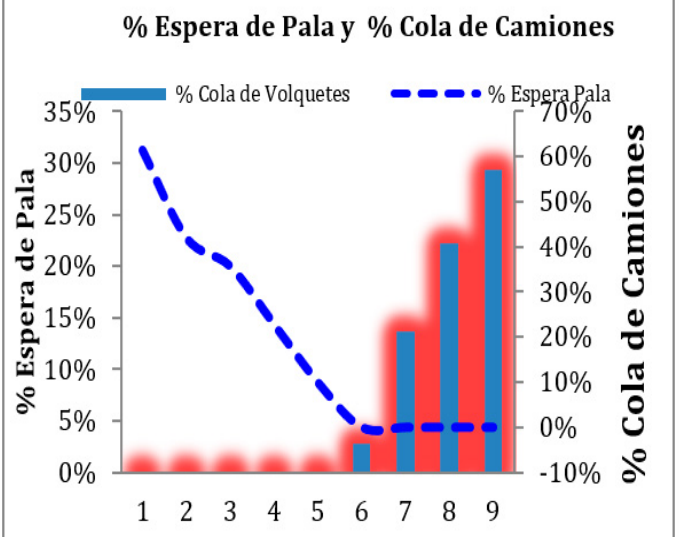


Figura 4 2: Sistema 1 Pala- 1 Destino: % Espera Vs % Cola

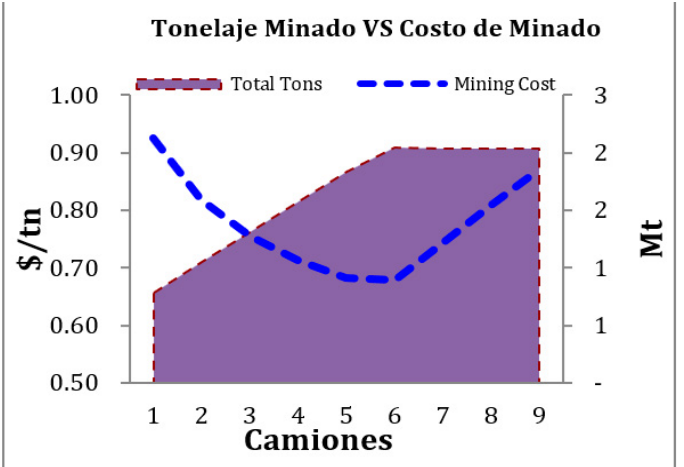


Figura 4 3: Sistema 1 Pala- 1 Destino: Tonelaje minado Vs Costo de minado

La figura 5-2 muestra cómo a medida que se incrementa el número de camiones al sistema, el porcentaje de espera de la pala disminuye. Asimismo, un incremento de número de camiones significa un incremento de tiempo en cola. En la figura 5-3 se visualiza cómo el mínimo costo unitario de minado ocurre en el máximo de la producción posible, como se mostró en el fundamento teórico. También se puede estimar que seis es la cantidad óptima de camiones que este sistema necesita, a un costo mínimo operativo de 0.68 dólares por tonelada.

El sistema que se acaba de desarrollar es básico, pero permite comprobar los fundamentos teóricos y profundizar en un sistema más realista: un sistema de múltiples palas y múltiples destinos analizados a continuación.

4.2 Caso 2: Sistema de múltiples palas y destinos

En el mundo real las operaciones mineras realizan sus actividades en múltiples zonas o fases, y el material extraído es clasificado por leyes de corte y tipos de desmonte, con lo que se tienen múltiples destinos tales como Stock piles, chancadoras,



botaderos, etc. De la misma manera que el caso anterior, la pregunta es que, dado un escenario de producción, ¿cuántos camiones son necesarios? En este caso existen dos maneras en simulación de estimar la cantidad de camiones. La primera es analizar cada pala y, en función del tipo de material que tienen, determinar la cantidad de camiones que son necesarios usando el algoritmo del caso 1. Luego de analizar todas las palas, sumar la cantidad de camiones de cada una y se obtiene la cantidad de camiones que el plan de minado necesita para cumplir con la producción requerida. Esta metodología es muy parecida a lo que la industria realiza actualmente, pero usando métodos discretos y Excel para estimar la cantidad de camiones, una estimación en donde no se toma en cuenta el comportamiento de las colas y esperas del sistema.

Otra manera es la estimación de camiones donde interactúan todos estos, las palas y los destinos, es decir, un análisis dinámico. Para ello es conveniente revisar el capítulo 4, sección 4.2, donde se explica la metodología y el algoritmo de asignación dinámico a usar.

Para demostrar este sistema se ha construido un programa en GPSS, cuyo código puede ser revisado en el Anexo 2 y 4, al igual que el testeo de su algoritmo correspondiente.

4.2.1 Elementos del Sistema

Este sistema cuenta con tres fases de minado. En cada fase tenemos una pala. Para este caso tenemos una chancadora y un stock cerca de la chancadora para

enviar mineral a esta cuando esté saturada o falle. Para el desmonte consideramos tres botaderos. Ver figura 8-3.

Algo importante en este sistema es que se ha creado zonas de mineral y desmonte en el minado de las palas, por lo que la alimentación de mineral a la chancadora dependerá del avance de la pala. Es un sistema complejo con fases de mineral y desmonte, no en proporción, sino que su minado está en función del tiempo dado que tiene una ubicación geométrica. Esto es para hacer que el sistema sea más realista desde el punto de vista de la ubicación de los tipos de material. Lo tradicional del sistema simulado es que se considere que todos los materiales se minen en forma proporcional a su cantidad, pero ignorando su ubicación.

Como se explica en el capítulo 4, hay algoritmos de asignación dinámica ubicados en las intersecciones y salidas de botadero y chancadora con el objetivo de asignar dinámicamente a los camiones y así maximizar la producción de la mina.

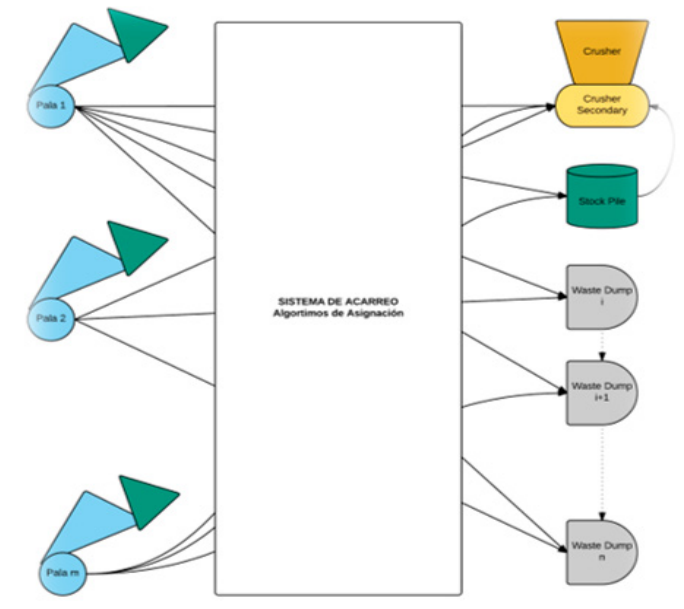


Figura 4 4 : Sistema Pala-Camión

Este sistema tiene 3 Palas Komatsu 1200E con una productividad promedio real de 2200 toneladas por hora. Los camiones para este sistema son los Cat 785C de 148 toneladas de capacidad. Los tiempos de acarreo promedios han sido calculados en base a las velocidades obtenidas de campo y velocidades máximas desarrolladas que se muestran en la figura 5-5.

Ruta Plano	Velocidad(Km/hr)
Camión Lleno	19.21
Camión Vacio	23.37
Ruta Rampa -8%	Velocidad(Km/hr)
Camión Lleno	11.05
Camión Vacio	27.77
Ruta Rampa +8%	Velocidad(Km/hr)
Camión Lleno	20.35
Camión Vacio	21.36

Figura 4 5 : Velocidades de acarreo

Como resultado de aplicar estas velocidades a las rutas de acarreo obtenemos los tiempos de acarreo nominales. Adicionalmente los tiempos fijos del sistema Pala-Camión se muestran en la figura 5-6.

Tiempos Fijos en Pala para Cat 785 C		
Palas	Carguío (min)	Cuadrado(min)
Pala 1	2.59	0.96
Pala 2	2.59	0.96
Pala 3	2.72	0.96

Tiempos Fijos Cat 785 C		
Destino	Descarga (min)	Cuadrado(min)
Chancadora	1.83	1.27
Botadero	0.62	1.07

Figura 4 6 : Tiempos fijos

4.2.2 Resultados de la simulación

En este caso se puede estimar la cantidad de camiones óptimo del sistema de producción de tres palas y cinco destinos (tres botaderos, un stock y una chancadora), con 36 camiones. Este resultado es el óptimo que asegura que el sistema obtenga la máxima producción total, pero no es necesariamente lo que el plan minero está requiriendo. Esto se debe a que el plan está sujeto a maximizar el NPV del negocio minero por lo cual cada fase no siempre se desarrolla como exige la optimización del Match Factor. Para esto, en el programa se tienen que asignar prioridades de minado de las fases para cumplir con el requerimiento del plan minero, que se puede implementar al cambiar la productividad de las palas en el programa GPSS.

Esta manipulación origina que la producción esperada de la simulación diste del óptimo si se libera el optimizador, por ello es que cuando se simule se debe buscar cumplir con la producción de las fases. La estimación de camiones y los parámetros como porcentaje de espera de las palas, porcentaje de cola de camiones y productividad de palas, puede ser diferente del óptimo del sistema productivo.

En general, un plan minero debería ser desarrollado con el objetivo de usar al máximo la productividad de las palas, pero en algunos casos los equipos cumplen funciones complementarias en el desarrollo de las fases de minado –como



ARTÍCULOS TÉCNICOS ►

los cargadores frontales que en ocasiones se usan parcialmente para el arranque de bancos, perfilado de taludes y limpieza de crestas. En estos casos, el equipo de carguío es subutilizado y tiene un alto porcentaje de espera.

Los resultados de este ejemplo demuestran que es posible estimar no solo la cantidad de camiones que un plan minero necesita, sino también muchos parámetros de control como el costo de minado del sistema productivo. Para este ejemplo, como se visualiza en la figura 5-10, el costo unitario de minado permanece constante o casi constante desde los 13 hasta los 36 camiones, y se incrementa ligeramente al pasar del óptimo. De la experiencia de simular múltiples escenarios, se ve que es un caso particular dado que con otra configuración de desmonte y mineral el costo unitario de minado puede variar significativamente.

En las figuras 5-11 y 5-12 se puede ver el comportamiento de la productividad de la mina y la chancadora con diferentes escenarios de camiones. También se puede ver la evolución de la productividad de las palas y las colas en cada pala, tal como se muestra en la figura 5-13, 5-14 y 5-15.

En conclusión, se puede tener un espectro del sistema productivo tanto desde el punto de vista económico como el de producción y tomar decisiones con respecto a la cantidad de camiones, cantidad de cola en las palas, esperas, productividad y costo de minado.

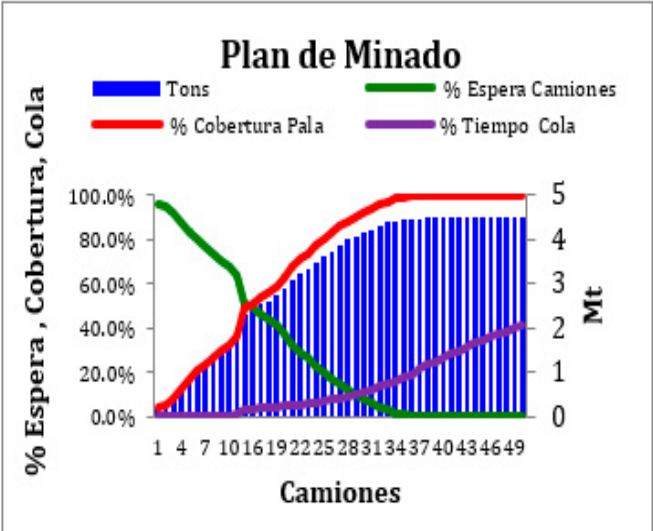


Figura 4 7: Sistema Múltiples Palas- Múltiples Destinos: Plan de minado y sus relaciones



Figura 4 8: Sistema Múltiples Palas- Múltiples Destino: Producción por Fase

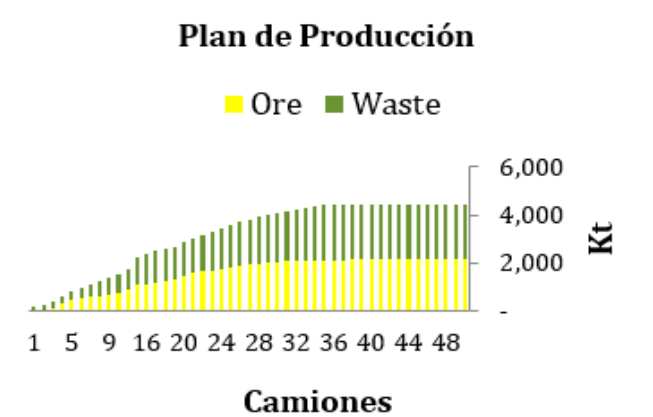


Figura 4 9: Sistema Múltiples Palas- Múltiples Destinos: Plan de minado (Mineral y Desmonte)

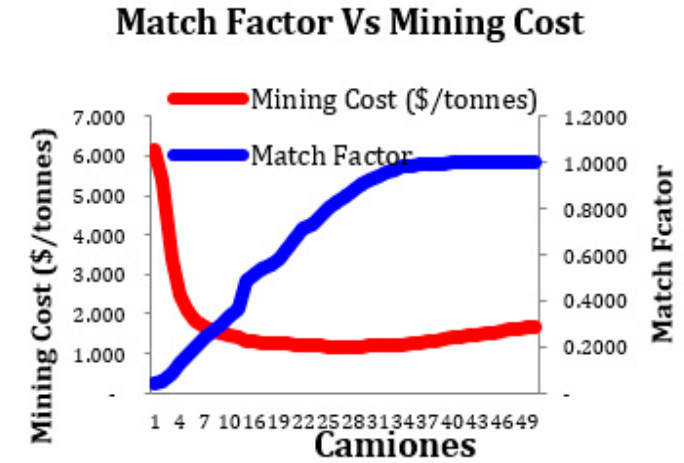


Figura 4 10: Sistema Múltiples Palas- Múltiples Destinos: Match Factor Vs Mining Cost

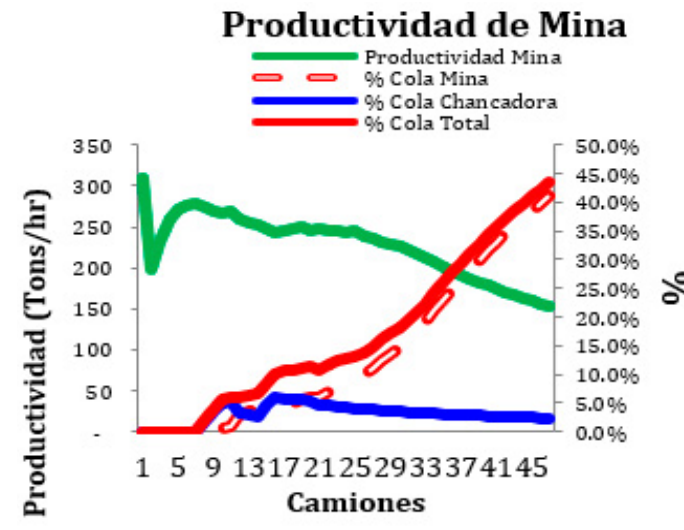


Figura 4 11: Sistema Múltiples Palas- Múltiples Destinos: Productividad de Mina

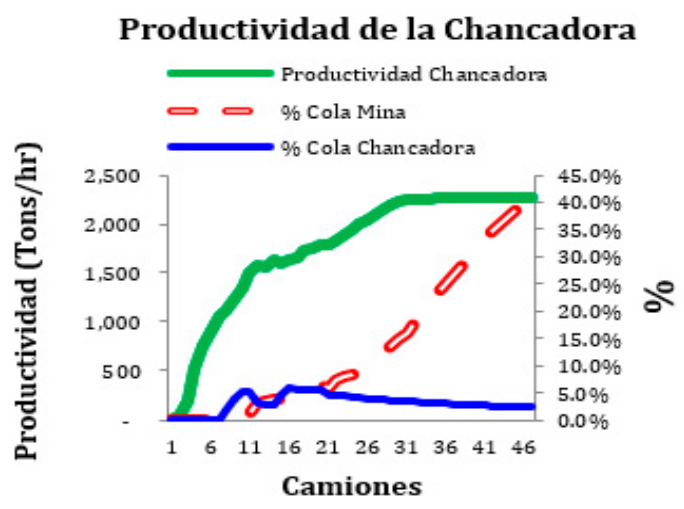


Figura 4 12: Sistema Múltiples Palas- Múltiples Destino: Productividad de Chancadora

◀ ARTÍCULOS TÉCNICOS

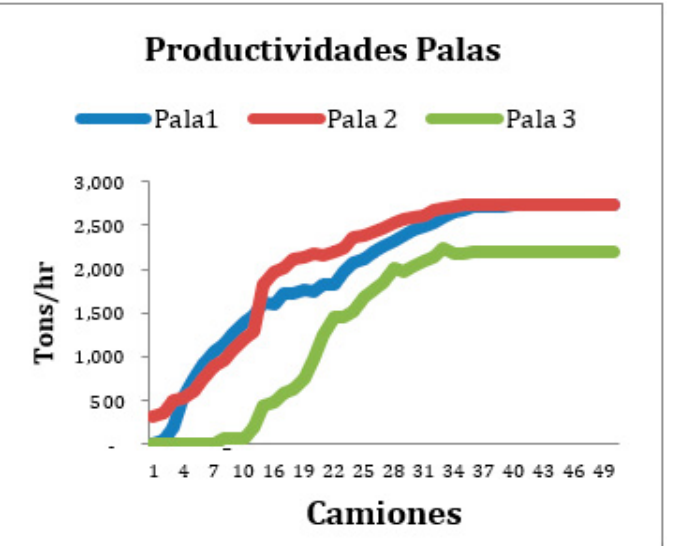


Figura 4 13: Sistema Múltiples Palas- Múltiples Destino: Productividad de Palas

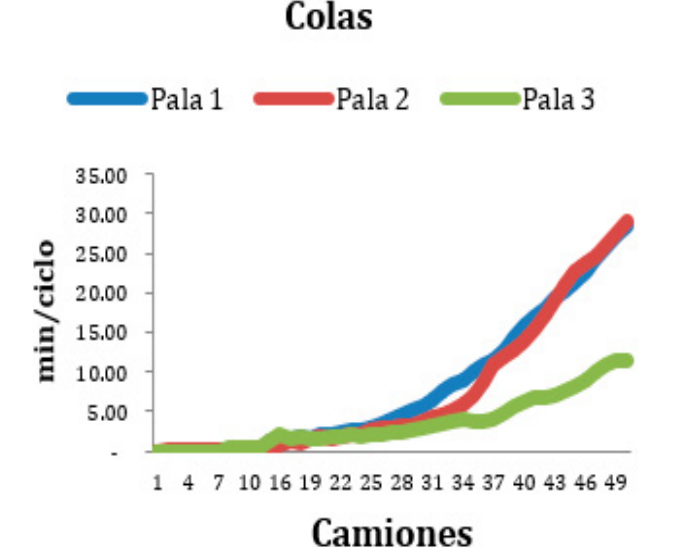


Figura 4 14: Sistema Múltiples Palas-Múltiples Destinos: Colas en las Palas

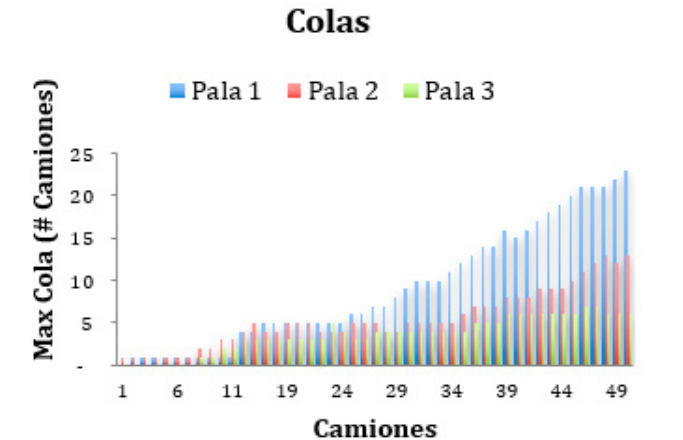


Figura 4 15: Sistema Múltiples Palas- Múltiples Destino: # de camiones en cola



En todos los escenarios de simulación siempre se estima la cantidad de camiones requerida, pero usualmente se olvida el porcentaje de cola asociado. Como se demostró en el capítulo 3, la ecuación 5.2 muestra la relación entre la cantidad de camiones óptima y el porcentaje de cola. Dicha función es la que se muestra a continuación, donde se cumple que la cantidad de camiones óptima  $n_0$  es igual a  $(m(tx) \cdot (-q)) / (1 - Q_{n_0}) \cdot (tc_i + ts_i)$ . Este resultado muestra que se puede llegar al óptimo pero sujeto a un nivel de cola asociado.

Volviendo al ejemplo de la simulación se puede ver en la figura 5-11 que, para 36 camiones, que es el óptimo, la pala 1 está soportando en ocasiones un máximo de 10 camiones en cola. Las preguntas que surge en este punto son: ¿Será factible operar con 36 camiones? ¿Qué riegos asociados a esta cantidad de camiones se esconden ‘tras bambalinas’? ¿Existirá una capacidad máxima asociada a nuestro sistema productivo que acote esta cantidad de camiones?

Estos cuestionamientos no son tema de este documento, pero se darán las pautas para futuras investigaciones, que se han desarrollado pero que no serán expuestas para no salir de la línea de investigación de este documento. Con todo lo desarrollado hasta ahora, se tiene cubierto todos los objetivos planteados que responden a la necesidad de estimar la óptima cantidad de camiones que necesita un sistema productivo para cumplir con sus objetivos.

## 5. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

Así, podemos concluir lo siguiente:

La simulación unida a la optimización de procesos es una herramienta poderosa para conocer el comportamiento económico y productivo de un sistema minero. Como consecuencia, se puede determinar la flota óptima que máxima la producción.

Hemos demostrado que el Match Factor se rige por la ecuación siguiente;

$$MF_{nm} = \frac{n(tc_i + ts_i)}{m\bar{t}x_q} = \left( \frac{(1 - E_m)}{(1 - Q_n)} \right) \left( \frac{\bar{t}x_{-q}}{\bar{t}x_q} \right) = 1 - E_m$$

Esta extensión es un aporte del autor al conocimiento de la estimación de equipos para una mina cuya relación a la fecha no incluía colas de camiones ni esperas de palas. Muestra que en un sistema productivo existe una relación entre las colas y las esperas y que el Match Factor en un sistema real jamás será mayor que la unidad dado que la cola absorberá dichos camiones extras incrementándose el ciclo de acarreo.

En ese punto el sistema ha colapsado y, dado que las palas limitan el sistema en términos de producción, el Match Factor máximo será igual a 1. Esta ecuación considera que el número de palas es constante y ha sido estimado antes, dado que ya existe un plan de producción.

También se demostró que la cantidad óptima de camiones está dada por la siguiente ecuación;

Y qué ocurre cuando el costo unitario de

minado es el mínimo y es igual a:

$$n_0 = \frac{m\bar{t}x_{-q}}{(1 - Q_{n_0})(tc_i + ts_i)}$$

Bajo esta premisa es que se desarrolló la metodología de estimación de camiones y se unificó el espectro económico y producción de un sistema minero, cuyos resultados simulados corresponden a la matemática desarrollada, como se mostró en el capítulo anterior. La formulación matemática del sistema está dada por la siguiente expresión:

$$umc_{n_0} = \frac{\sum_{i=1}^m Ch_i H_i + \sum_{j=1}^{n_0} Ch_j H_j + GA_{mn_0}}{\frac{fc}{tc_i + ts_i} \sum_{i=1}^m H_i}$$

Donde  $S(m, n, r(x, y, z), d)$  es un sistema de acarreo de  $m$  palas,  $n$  camiones,  $r$  rutas de acarreo y  $d$  destinos.

$$\forall S(m, n, r(x, y, z), d), \exists n_0 \setminus P_{n_0} = \max_n P_n \cap umc_{n_0} = \min_n umc_n \rightarrow MF_{n_0m} = 1$$

De la ecuación del número óptimo de camiones se desprendió que existe una conexión entre la cantidad de camiones requerida y el porcentaje de cola asociado. Este nos brinda el nivel de factibilidad con que el plan de producción será ejecutado. Aquí es donde nace un nuevo estudio: el análisis de Congestión de la Mina. Es imprescindible, dado la cantidad de camiones que una operación minera requiere, determinar el nivel de congestión de la operación y la capacidad de diseño de las intersecciones y rampas que constituyen el sistema de acarreo.

**Nombre del autor:** Jorge Lozano

**Cargo:** Co-founder de Deep Pit Technology

**Empresa:** Deep Pit Technology

**Correo electrónico:** jorge.lozano@deeppit.org

**Teléfono / Celular:** +51 1 942767514

**Perfil profesional:**

Jorge Lozano es Ingeniero de Minas de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) con 14 años de experiencia profesional. En el 2006 formo parte de la Selección de Computación de la UNI y ha representado al Perú y a la UNI en concursos de programación a nivel internacional como el IPCC-ACM Computer. Empresario, emprendedor, minero, programador, fundador de Deep Pit Technology en Perú. Jorge tiene experiencia en Ore control, Dispatch, Desarrollo software, Operaciones, Planeamiento de minado corto plazo, Planeamiento de minado mediano plazo, Planeamiento de minado a largo plazo y Planeamiento estratégico en Barrick Pierina, Barrick Lagunas Norte, Antamina e Inti Mining Smart Solutions. Actualmente se desempeña como director de Tecnología en Deep Pit Technology.

Entre de los proyectos más importantes que ha colaborado se encuentran las minas Antamina, Las Bambas, Shahuindo, La Arena, Mar Cobre, El Brocal, Corani, Sierra Gorda (Chile), Spence (Chile), Cerro Matoso (Colombia), Toquepala, Cerro Colorado (Chile), Eco Cemento (Ecuador), Cápulo Mining (Congo), Emincar (Cuba), Proyectos Confidenciales BHP (Chile-Perú), Proyectos Confidenciales Ausenco (Perú), Proyecto Magistral, Catalina Huanca, Nueva Unión Teck (Chile), Lagunas Norte, Miskimayo, Chinalco, Pierina, Hudbay Constancia.





**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
Facultad de Ingeniería Geológica,  
Minera y Metalúrgica

**UNIDAD DE POSGRADO**



Engineering  
Accreditation  
Commission

# PROGRAMAS DE MAESTRÍA ADMISIÓN 2023-I

**Inicio de clases - Abril**

La Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica de la Universidad Nacional de Ingeniería y la Agencia de Cooperación Internacional de Corea (KOICA) hemos iniciado formalmente las coordinaciones de implementación del proyecto “Mejoramiento de los Procesos de Cierre Minero y Remediación de Pasivos Ambientales Mineros para el Cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible”.

Los beneficiarios de este proyecto serán las entidades públicas con responsabilidad en gestión de pasivos mineros y planes de cierres de minas; titulares mineros que registren información en la PCM; así como las comunidades y público en general.



*“Juntos para el desarrollo sostenible de la actividad minera”*



- **GESTIÓN MINERA**
- **MINERÍA Y MEDIO AMBIENTE**
- **SEGURIDAD Y SALUD MINERA**
- **INGENIERÍA DE MINAS**
- **INGENIERÍA METALÚRGICA**
- **INGENIERÍA GEOLÓGICA**

## INFORMES Y VENTA DE CARPETAS

Sección de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica



**Telefax:** 381-3843, 481-1070 anexo 4252.



**E-mail:** pg\_figmm@uni.edu.pe

**Horario de Atención:** Lunes a Viernes : 8:30am. - 4:00 pm.