

UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL



PROPUESTA DE UN MODELO DE OPERACIÓN
PARA LA CADENA DE SUMINISTRO DE CEMENTO
DE LA MINA TAMBOMAYO

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Para optar el grado de bachiller en Ingeniería Industrial

AUTORES

Francisco Franco Conroy (Código: 201510120)

Mariana Arriz Jorquiera (Código: 201510164)

ASESORES

Claudia Fausta Antonini Bova (ORCID: 0000-0003-0008-5879)

Fabien Yves Paul Cornillier (ORCID: 0000-0002-7240-6830)

Lima – Perú

2020

Dedicatoria:

Esta tesis va dedicada a nuestros padres, por habernos educado con los valores que ahora tenemos y por haber confiado en nosotros desde que tenemos memoria. A nuestros hermanos y hermanas, que nos motivan todos los días a seguir adelante. Y a nuestros abuelos, por su apoyo incondicional en cada paso que damos.

Somos muy afortunados y estamos muy orgullosos de las familias que tenemos, es para ellos que va este logro.

Agradecimientos:

A nuestros asesores Claudia Antonini y Fabien Cornillier, porque sus conocimientos y su apoyo intensivo cada semana fueron sustanciales para concluir con éxito esta tesis.

A Juan Diego y Benjamín Franco, de la empresa FC Transportes. Por su entusiasmo y apoyo desde que nació este proyecto, y por brindarnos toda la información necesaria para desarrollarlo.

A Roque Benavides, de la empresa Buenaventura. Por confiar en nosotros y en este proyecto, y permitirnos utilizar información de la empresa.

A todos los profesores y personal administrativo de la Universidad de Ingeniería y Tecnología, especialmente al profesor José Larco y a Verónica Lunga, por su apoyo desde nuestros primeros pasos en la carrera. Un agradecimiento especial para la profesora Eunice Villicaña, por su motivación, guía, y apoyo constante durante los últimos 5 años.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	6
ABSTRACT.....	7
INTRODUCCIÓN.....	8
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO.....	13
1.1. Conceptos de minería.....	13
1.1.1. Fundamentos de la minería.....	13
1.1.2. Estratificación de la minería.....	14
1.1.3. Minería formal y no formal.....	15
1.1.4. Minería superficial y subterránea.....	18
1.2. Proceso de extracción en una mina subterránea.....	20
1.3. Accidentalidad en minas.....	21
1.3.1. Definición de accidente en mina.....	21
1.3.2. Clasificación de los accidentes de trabajo de acuerdo a la gravedad.....	22
1.4. Políticas.....	23
1.4.1. Políticas de seguridad.....	23
1.4.2. Políticas de abastecimiento.....	25
1.5. Implmentación de un <i>hub</i> logístico.....	25
1.5.1. Definición de <i>hub</i> logístico.....	25
1.5.2. Clasificación y estructura de un <i>hub</i> logístico.....	26
1.5.3. Objetivos de un <i>hub</i> logístico en la cadena de suministro de una mina.....	27
1.5.4. Características y funciones de un <i>hub</i> logístico.....	27

1.5.5.	Criterios de implementación de un <i>hub</i> logístico	29
1.5.6.	Retos en la implementación de un <i>hub</i> logístico	30
1.6.	Variabilidad en la demanda de suministros en una mina.....	30
1.7.	Simulación de escenarios	31
1.7.1.	Herramientas de simulación	32
1.8.	Toma de decisiones bajo incertidumbre.....	33
1.8.1	Análisis de decisión multicriterio (MCDA).....	34
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA		35
2.1.	Variables de decisión	37
2.2.	Variables contextuales e independientes	37
2.3.	Fuentes de información e instrumentos de medición	38
2.4.	Toma de decisiones.....	39
CAPÍTULO III: RESULTADOS.....		40
3.1.	Análisis de datos	40
3.2.	Simulación de escenarios.....	45
3.3.	Análisis y comparación de escenarios	47
RECOMENDACIONES		50
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		53
ANEXOS.....		58

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Perú en el Ranking de Producción Minera	14
Tabla 2. Ratio de minería no formal registrada / no registrada	17
Tabla 3. Días entre salidas de Yura.....	44
Tabla 4. Unidades descargadas por día.....	44

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Estratificación de la Minería.....	15
Figura 2. Titulares Mineros por Estrato	15
Figura 3. Producción de oro formal e informal en Perú	17
Figura 4. Minería superficial	19
Figura 5. Minería subterránea	20
Figura 6. Extracción en una mina subterránea	21
Figura 7. Accidentes por causa en los últimos 10 años	22
Figura 8. Pirámide Frank Bird.....	23
Figura 9. Modelos de simulación	31
Figura 10. Métodos en Modelos de optimización de simulación	32
Figura 11. Días de <i>stand by</i> y cantidad de viajes	40
Figura 12. Probabilidad de unidades descargadas por día	42
Figura 13. Análisis de unidades en cadena	42
Figura 14. Tiempo de ruta a mina	43
Figura 15. Bosquejo de escenario sin <i>hub</i>	45
Figura 16. Bosquejo de escenario con <i>hub</i>	46
Figura 17. Tiempo de respuesta a mina	47
Figura 18. Costos de <i>stand by</i>	48
Figura 19. Riesgos por estadía en mina	48
Figura 20. Ubicación satelital del caserío, posible terreno para el <i>hub</i>	51

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1: Código python de ambos escenarios	59
Anexo 2: Matriz AMEF para riesgos en la mina	73
Anexo 3: Matriz AMEF para riesgos en la ruta a la mina	74

RESUMEN

La empresa Buenaventura es una de las compañías mineras más importantes del país. Entre sus Unidades Mineras, una de las principales es Tambomayo. Esta mina subterránea cuenta con el cemento como suministro crítico y necesario para la etapa de exploración y extracción, específicamente para la operación *shotcrete*. Sin embargo, el proceso de abastecimiento de este insumo es deficiente, las pérdidas generadas por *stand by* en la primera mitad del año 2019 ascendieron a S/. 119,000.00, esta penalidad es cobrada cuando los tractos que realizan el transporte del recurso se quedan parados y dejan de generar valor a la operación.

Esta tesis propone, a partir del análisis y la comparación de las simulaciones del escenario actual y el propuesto, y luego de analizar los tiempos de respuesta, costos y riesgos asociados, un modelo de operación que incluye un *hub* logístico en la ruta hacia mina como parte de la cadena de suministro del cemento. Adicionalmente, esta tesis propone recomendaciones asociadas a la implementación del *hub*.

PALABRAS CLAVE:

Minería; Abastecimiento; Cemento; Cadena de suministro; *Stand by*; Hub logístico; Simulaciones.

ABSTRACT

PROPOSAL FOR A MODEL OF OPERATION FOR THE CEMENT SUPPLY CHAIN OF THE TAMBOMAYO MINE

Buenaventura is one of the most important mining companies in the country. Among its mining units, one of the main ones is Tambomayo. For this underground mine, the cement is a critical and necessary supply for the exploration and extraction mining stage, specifically for the shotcrete operation. However, the supply process of this input is deficient, the losses generated by stand by in the first half of the year 2019 amounted to S/. 119,000.00, this penalty is charged when the tracts that make the transport of the resource are stopped and stop generating value to the operation.

This thesis proposes, based on the analysis and comparison of the simulations of the current and proposed scenarios, and after analyzing the response times, costs and associated risks, an operation model that includes a logistic hub on the route to the mine as part of the cement supply chain. Additionally, this thesis proposes recommendations associated with the implementation of the hub.

KEYWORDS:

Mining; Supply; Cement; Supply chain; Stand by; Logistics hub; Simulations.

INTRODUCCIÓN

La minería “es la actividad por la cual se cava en la tierra con el fin de extraer los metales o minerales que en ella existen siendo ayudados por maquinaria pesada y por mano de obra humana” [1]. En Perú esta actividad económica aporta, según el Instituto de Ingenieros de Minas del Perú, en promedio el 14% del Producto Bruto Interno nacional [2].

Las condiciones presentadas en Perú hacen a su minería única en comparación con otros países, considerando minas que llegan a pasar los 4000 msnm. Esto dificulta el acceso de infraestructura, el uso de equipos especializados, la distribución de combustibles y el acondicionamiento físico del personal que labora en la mina [3].

Buenaventura es una de las principales empresas mineras formales del país, que pertenece al estrato de gran minería y cuenta con casi 70 años de experiencia en el rubro minero. Esta contiene 19 Unidades Mineras (UM) en desarrollo, producción y en proyectos. Actualmente, las principales unidades productivas de Buenaventura son: Orcopampa (Arequipa), Tambomayo (Arequipa), la Zanja (Cajamarca), Coimolache (Cajamarca) y Río Seco (Lima).

La Unidad Minera (UM) Tambomayo, está ubicada a 4800 msnm en el distrito de Tapay, en la provincia Caylloma, en Arequipa. Su operación es a socavón (subterránea), en vetas de oro y plata. La capacidad de tratamiento de Tambomayo es de 2000 toneladas métricas diarias (TMD) [4].

Dadas las condiciones de Tambomayo antes mencionadas, para que se pueda realizar la extracción y producción de los concentrados uno de los materiales críticos y necesarios es el cemento. Este es utilizado para el proceso de chocreteado (*shootcrete*) de las paredes del socavón, necesarias para la operación minera subterránea. Hoy en día, el transporte de cemento está tercerizado con la empresa FC Transportes y Soluciones Especiales S.A.C. y se realiza en bombonas con capacidad de cargar hasta 30 toneladas en lugar de bolsas de 50 kg, dado que el transporte por bombonas genera menos

contaminación al medio ambiente y disminuye las ineficiencias por el tiempo invertido en labores.

La cadena de suministro del abastecimiento de cemento inicia en el requerimiento que realiza el área de logística de Buenaventura a la empresa proveedora de transporte. Este requerimiento está basado en la solicitud emitida por las áreas de mina (almacén, geomecánica, entre otras). Las unidades de transporte están conformadas por un tracto y una bombona; estas salen del almacén de FC Transportes y se dirigen a la planta de Yura, ubicada en las afueras de la ciudad de Arequipa, donde se disponen a cargar el tonelaje requerido. Luego parten con dirección a Tambomayo, ruta de aproximadamente 280 km a donde llegan luego de entre uno y dos días.

El tramo de Yura hasta el desvío de Chivay a Cusco (los 100 km iniciales aproximadamente) se encuentran asfaltados. La distancia restante es trocha precipitada deteriorada, debido a que el paso de unidades y la climatología presente en las alturas de la sierra han generado que algunos tramos de ruta presenten lodo, huecos, nieve, inundaciones por río, rocas, desvíos a precipicios, desvíos por huaycos, entre otras complicaciones.

Las unidades llegan a Tambomayo y deben esperar una cola de camiones que, por prioridad de acuerdo al tipo de insumo, pasan por garita para la verificación en ingreso a mina. Una vez dentro de la mina, las unidades deben esperar en la cola del insumo que llevan; en este caso, cola de cemento, antes de empezar con el proceso de descarga, que se realiza en un silo con capacidad de 70 toneladas. Muchas veces ocurre que el silo está lleno y durante varias horas no libera su capacidad, entonces el camión que se encuentre adelante en la fila debe seguir esperando para poder descargar su contenido y retirarse.

Esta espera frecuentemente se extiende a días, generando una penalidad llamada *stand by*, que la empresa transportista cobra por tener sus unidades paradas. En este caso, la empresa transportista da a Buenaventura un plazo de dos días para realizar la descarga, caso contrario al tercer día se procede a cobrar cobran 500 soles de *stand by* por cada día que la unidad siga en cola.

Justificación del problema

La empresa Buenaventura cuenta con diferentes cadenas de suministros para los insumos requeridos (cal, cemento, peróxido, cianuro, petróleo, entre otros) en cada una de sus unidades mineras. Para que el suministro de estos insumos funcione, existe una planificación entre la unidad minera y las áreas de Logística, Almacén y Planeamiento de Geomecánica de la empresa Buenaventura. Frecuentemente, en esta planificación ocurren errores importantes como el requerimiento de una cantidad incorrecta de unidades: cada mes, hay por lo menos 5 unidades que son descargadas más de dos días después de llegar a mina (cobran *stand by*) dado que se realizan los requerimientos por cantidades mayores que las necesarias. Otro desencadenante de errores es la descoordinación entre las partes involucradas, pues ocurre que cada semana se solicita un mínimo de dos unidades adicionales como *backup* de emergencia. Adicionalmente a los inconvenientes que ya existen en la ruta hacia la mina y los problemas sociales existentes en las zonas aledañas, estas solicitudes son peligrosas porque aumentan los riesgos asociados a la ruta dado que el transporte en estos casos se realiza sin que los choferes tengan descanso.

Adicionalmente, la mina carece de un espacio de maniobras adecuado para las unidades que llegan a abastecer de cemento, lo mismo ocurre en las otras cadenas de diferentes *supplies*. Esto, adicionado a la descoordinación mencionada, genera congestión vehicular en la mina; y así el aumento de los costos y riesgos debidos al pernocte de las unidades y sus choferes dentro de mina, lo cual requiere de una logística adicional.

Las complicaciones en la ruta pueden desencadenar en incidentes o accidentes que afecten a las empresas involucradas en la cadena de suministro por las repercusiones que puedan tener con el medio ambiente y las comunidades. El personal de la empresa transportista está capacitado para cumplir las labores de chofer y de operario sobre la unidad que cada uno tiene asignada, y no para ejercer funciones que derivan del hecho de permanecer en la mina. En consecuencia, existe un peligro potencial para el personal que se queda en la mina, como puede ser el traslado de garita a almacén o el de transitar en la mina. Los riesgos de accidentes, fallas y demoras aumentan por tener las unidades mucho tiempo dentro de mina sin descargar, detenidas en el espacio donde se realizan las

maniobras y ocupando espacio que debería ser utilizado para los movimientos de las unidades.

Objetivos

La presente tesis propone un modelo de operación para la cadena de abastecimiento de cemento de la mina Tambomayo, en el que se trabaje con un *hub* logístico como nueva modalidad en la distribución de *commodities* para la mina. Para conseguirlo, se estableció como objetivo principal evaluar la viabilidad de la implementación de un *hub* a través de la simulación de dos escenarios: la cadena de suministro del abastecimiento del cemento con la operación actual y la del modelo propuesto. Entre otros objetivos específicos, se procurará establecer los modelos y parámetros de las variables de interés: tiempo entre llegadas, tiempo entre descargas, tiempo de cola, tiempo entre pedidos, tiempo entre salidas, etc; determinar la ubicación y capacidad del *hub*; establecer las nuevas políticas de abastecimiento de cemento en la cadena (unidades en el *hub*, unidades en mina, unidades en la cadena); reducir los riesgos de seguridad debido a la congestión de unidades en el proceso de abastecimiento y descarga de la mina; y reducir los costos directos e indirectos, en los que se incurre por *stand by*.

Preguntas de investigación

La simulación de los escenarios será la herramienta utilizada para responder qué impacto puede tener el *hub* en la cadena y cómo cuantificar este. Los resultados obtenidos luego de correr el modelo brindarán la información necesaria para definir las dimensiones del *hub*. Por último, serán definidas las políticas y restricciones que el *hub* logístico debe cumplir para lograr el óptimo funcionamiento del modelo de operación.

Ante esta situación, las bibliotecas tienen un rol que cumplir pues el carácter educativo que las identifica puede ser beneficioso si los bibliotecarios trabajan de manera participativa en la formación de los estudiantes colaborando así con el éxito académico. El rol que debe asumir el bibliotecario se centra en lograr que los estudiantes posean

competencias informativas teniendo presente que un alumno que posee habilidades de búsqueda, análisis y uso de la información estará en ventaja sobre otros, lo cual le permitirá, sin duda, desarrollarse con éxito.

Ante esta situación, las bibliotecas tienen un rol que cumplir pues el carácter educativo que las identifica puede ser beneficioso si los bibliotecarios trabajan de manera participativa en la formación de los estudiantes colaborando así con el éxito académico. El rol que debe asumir el bibliotecario se centra en lograr que los estudiantes posean competencias informativas teniendo presente que un alumno que posee habilidades de búsqueda, análisis y uso de la información estará en ventaja sobre otros, lo cual le permitirá, sin duda, desarrollarse con éxito.

Ante esta situación, las bibliotecas tienen un rol que cumplir pues el carácter educativo que las identifica puede ser beneficioso si los bibliotecarios trabajan de manera participativa en la formación de los estudiantes colaborando así con el éxito académico. El rol que debe asumir el bibliotecario se centra en lograr que los estudiantes posean competencias informativas teniendo presente que un alumno que posee habilidades de búsqueda, análisis y uso de la información estará en ventaja sobre otros, lo cual le permitirá, sin duda, desarrollarse con éxito.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se explicará la teoría utilizada en el desarrollo de esta tesis.

1.1. Conceptos de minería

Para entrar en contexto con el funcionamiento de una mina en Perú, es necesario conocer los fundamentos de la minería peruana, y con ellos la estratificación y las diferentes clasificaciones de la minería en el Perú. Así, reconocer cuando una mina es formal o no formal, o si es superficial o subterránea, entre otros tipos de clasificaciones.

1.1.1. Fundamentos de la minería

Según el Glosario Técnico Minero publicado por el Ministerio de Minas y Energía de Colombia [5], la Minería involucra:

Ciencia, técnicas y actividades que tienen que ver con el descubrimiento y la explotación de yacimientos minerales. Estrictamente hablando, el término se relaciona con los trabajos subterráneos encaminados al arranque y al tratamiento de una mena o la roca asociada. En la práctica, el término incluye las operaciones a cielo abierto, canteras, dragado aluvial y operaciones combinadas que incluyen el tratamiento y la transformación bajo tierra o en superficie. La minería es una de las actividades más antiguas de la humanidad, consiste en la obtención selectiva de minerales y otros materiales a partir de la corteza terrestre [5].

En este sentido, el Perú es un país minero por excelencia, con “una tradición metalúrgica que se remonta a más de 10,000 años (...) con la extracción de minerales no metálicos como el cuarzo, riolita, toba, cuarcita y calcedonia, con la finalidad de elaborar instrumentos de caza, pesca y recolección” [6]. Sin embargo, actualmente este sector ha crecido y el portafolio de minerales se ha extendido; los principales productos de obtención ahora son Zinc, Estaño, Plata, Cobre, Plomo, Molibdeno y Oro.

Roque Benavides, en su libro *La minería responsable y sus aportes al desarrollo del Perú*, menciona: “El Perú tiene un gran potencial en las zonas altoandinas, gracias al cual importantes empresas líderes desarrollan proyectos de envergadura. Nuestros minerales tienen gran demanda en mercados como USA, China, Suiza, Canadá, Japón, entre otros.” [7] Entonces, vale decir que el potencial minero del Perú compite mundialmente; posicionándose en el ranking mostrado en la Tabla 1, lo que posiciona al sector minero como uno de los más contribuyentes al desarrollo económico del país.

Perú en el Ranking de Producción Minera [8]		
Metal	Ranking en Latinoamérica	Ranking Mundial
Oro	1	6
Cobre	2	2
Plata	2	2
Zinc	1	2

Tabla 1. Perú en el Ranking de Producción Minera [8]

1.1.2. Estratificación de la minería

En Perú, la actividad minera formal está estratificada en: Gran y Mediana Minería, Pequeña Minería y Minería Artesanal. Según la Sociedad Peruana de Derecho Ambiental (SPDA), “estos estratos se definen de acuerdo a la escala de producción de las operaciones mineras (medida en términos de capacidad de producción o beneficio y extensión del área explotada) y se encuentran regulados por dos tipos de régimen minero que establecen un conjunto de obligaciones, expresadas fundamentalmente en la producción anual mínima requerida y el pago de un derecho de vigencia” [9]. Las características de estos estratos se muestran en el siguiente diagrama:



Figura 1. Estratificación de la Minería. Fuente: Sociedad Peruana de Derecho Ambiental (SPDA) [9]. Elaboración propia

“Hasta diciembre del 2018, el Ministerio de Energía y Minas (MINEM) ha registrado un total de 12,224 titulares mineros, de los cuales referencialmente 1,532 pertenecen a la pequeña minería; 175 a la minería artesanal y 10,517 a la gran y mediana minería” [10]. Esto se observa en la Figura 2.



Figura 2. Titulares Mineros por Estrato (Elaboración propia). Datos obtenidos de MINEM [10]

1.1.3. Minería formal y no formal

Según el Ministerio de Energía y Minas (MINEM), la minería en el Perú se divide en formal y no formal [3]. Estos dos tipos de minería se diferencian principalmente por el cumplimiento de los requisitos y permisos necesarios para la actividad y por las zonas de operación.

Minería Formal

La minería formal comprende los cuatro estratos mencionados anteriormente: Mediana y Gran Minería, Pequeña Minería y Minería Artesanal. Según el MINEM, esta clasificación de la minería “cumple con todos los requisitos y permisos mineros, ambientales, sociales, laborales, tributarios establecidos en nuestra normatividad legal vigente” [3]. Algunos de estos requisitos son: “concesión minera o contrato de cesión o explotación, permiso de uso del terreno superficial, estudio de impacto ambiental, licencia de uso de agua, licencia social, autorización de inicio o reinicio de operación minera”. [3]

Minería No Formal

La minería no formal, por otro lado, se subdivide en informal e ilegal. La minería informal es aquella actividad minera que opera en zonas no prohibidas y a pequeña escala (PPM-PMA), pero los equipos y maquinarias utilizados no corresponden a las características de PPM o PMA. Además, no cumple “con las exigencias de las normas de carácter administrativo, técnico, social y medioambiental que rigen dichas actividades”. Sin embargo, para ejercer esta actividad, es necesario haber empezado un proceso de formalización y contar con una declaración de compromiso.

Finalmente, la minería ilegal, según el MINEM, “es una actividad minera al margen de la Ley, que genera grandes utilidades sin ningún compromiso ni responsabilidad, depredando yacimientos, disturbando terrenos y causando graves daños ambientales en los recursos hídricos y en el sector agropecuario así como daños a la salud de las poblaciones y generando además serios conflictos sociales” [3].

El Figura 3 presenta la producción ilegal e informal de oro en el Perú, registrada y no registrada, durante el período 2003 – 2014:

Oro: Valor de la producción ilegal e informal, 2003 - 2014

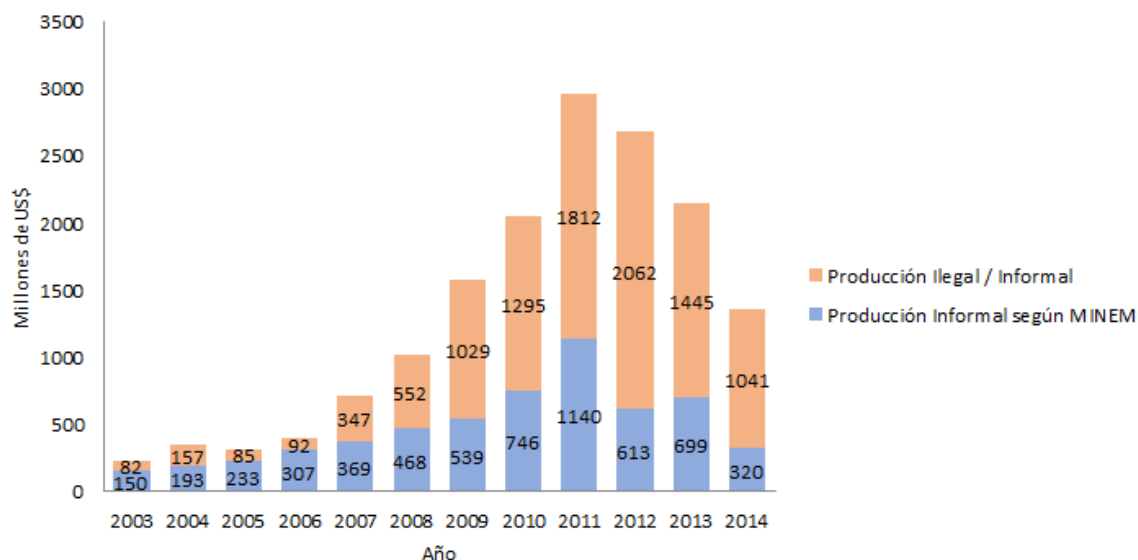


Figura 3. Producción de oro formal e informal en Perú. Elaboración propia. [11]

Este gráfico deja claro en primer lugar que, si bien la minería es una de las actividades que más aportan al PBI y su producción genera grandes cantidades de dinero, esta actividad también está produciendo grandes cantidades de dinero de manera informal/ilegal; y de eso, gran proporción no es registrada. Para dar un panorama de la proporción, a continuación la Tabla 2 presenta el ratio de minería no formal registrada / no registrada, tomando los datos presentados en el gráfico anterior.

Año	No registrada (millones de \$)	Registrada (millones de \$)	Ratio
2003	82	150	0.55
2004	157	193	0.81
2005	85	233	0.36
2006	92	307	0.30
2007	347	369	0.94
2008	552	468	1.12
2009	1029	539	1.91

2010	1295	746	1.74
2011	1812	1140	1.59
2012	2062	613	3.36
2013	1445	699	2.07
2014	1041	320	3.25

Tabla 2. Ratio de minería no formal registrada / no registrada. Elaboración propia (Basado en [11])

Como se observa, la producción de minería no formal registrada/no registrada está creciendo de manera exponencial, llegando la producción ilegal e informal no registrada a triplicar la producción registrada.

1.1.4. Minería superficial y subterránea

Las unidades mineras en el país y el mundo también están clasificadas de acuerdo al método de explotación. Los dos principales son la minería a tajo abierto (superficial) y la minería a socavón (subterránea).

Minería superficial o a tajo abierto

Según el MINEM [12], las minas a tajo abierto son “aquellas cuyo proceso extractivo se realiza en la superficie del terreno, utilizando generalmente maquinarias de gran tamaño” como dragalinas, palas excavadoras, rotopalas, mototrailas, bulldozers, camiones, etc. Para esta actividad, es preciso diseñar el tajo y, mediante actividades topográficas, realizar el establecimiento de mallas perforadoras, actividades de perforación, carguío de explosivos y voladura. Posteriormente se carga y transporta el resto de minerales, que carecen de valor económico. El mineral extraído se transporta a zonas de almacenamiento para luego ser procesado en refinadoras o plantas de producción en donde se transforma en producto terminado.

Las minas a tajo abierto “son económicamente rentables cuando los yacimientos son diseminados y afloran o se encuentran cerca de la superficie”; de lo contrario, se

vuelve conveniente cambiar de método de explotación a minería subterránea [12]. En la Figura 4 se observa cómo lucen dos minas superficiales:



(a)

(b)

Figura 4. Minería superficial. (a) Tintaya, mina superficial en Cusco. (b) Yanacocha, mina superficial en Cajamarca. [12]

Minería subterránea o a socavón

Las minas subterráneas, por otro lado, son aquellas en las que, sea por razones económicas, sociales o ambientales, no es posible realizar el proceso extractivo a tajo abierto, y se desarrolla por debajo de la superficie del terreno.

Para la ejecución de esta actividad en un ambiente seguro, es necesario contar con ventilación, además de infraestructura como túneles, pozos, chimeneas y galerías, misma infraestructura que limita el tamaño de la maquinaria que se puede usar en la operación. Los equipos más usados son perforadoras mineras, palas cargadoras, grúas de levante, shotcrete, rozadoras, etc. En la Figura 5 se observa cómo lucen dos minas subterráneas:



(a)



(b)

Figura 5. Minería subterránea. (a) Tambomayo, Buenaventura. Mina subterránea en Arequipa, produce oro y plata. [13] (b) Cerro Lindo, Milpo. Mina subterránea en Ica, produce concentrados de zinc, plomo, plata y cobre [14]

Para realizar la actividad de extracción, la ley obliga a contar con una concesión de beneficio, que es una concesión minera que “confiere al titular minero la facultad de extraer o concentrar la parte valiosa de un agregado de minerales desarraigados, y/o a fundir, purificar o refinar metales, mediante un conjunto de procesos físicos, químicos o físicos-químicos” [15].

De acuerdo a la información recabada en el 2011 por el MINEM, en el Perú existen 245 concesiones mineras superficiales y 130 subterráneas [12], siendo los departamentos con más concesiones: La Libertad (25 superficial y 50 subterránea), Arequipa (29 superficial y 33 subterránea), Lima (32 superficial y 23 subterránea), Ancash (18 superficial y 22 subterránea) y Junín (74 superficiales y 17 subterráneas).

1.2. Proceso de extracción de una mina subterránea

Según Murray Canfield [16], los principales procesos que componen la etapa de producción en una mina son: la extracción, el procesamiento, la fundición y la refinación. “La extracción subterránea se desarrolla bajo tierra y combina distintas técnicas que permiten que el proceso ocurra a grandes niveles de profundidad. Las principales labores dentro del proceso de extracción subterránea tienen relación con tronar y avanzar en zonas de producción, fortificando y habilitando zonas de trabajo que, bajo altos estándares de

seguridad, permitan extraer el mineral desde el yacimiento” [17]. En la Figura 6 se presenta de manera visual el proceso de extracción de una mina.

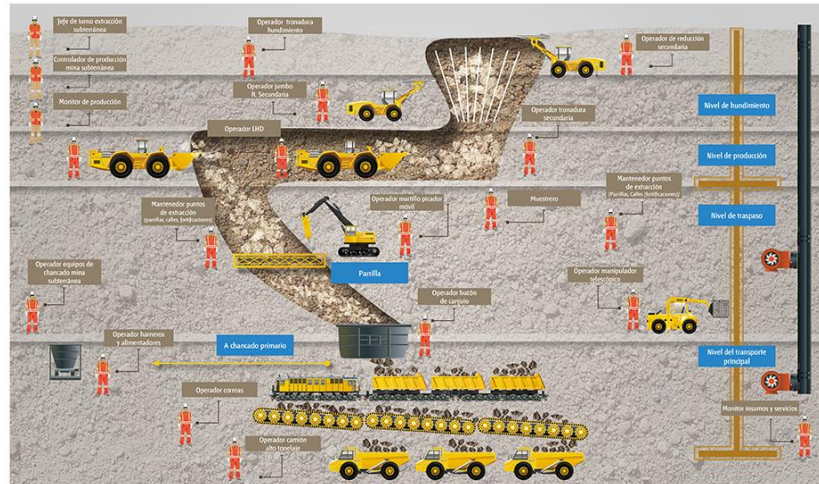


Figura 6. Extracción en una mina subterránea. Fuente: CCM [17]

1.3. Accidentalidad en minas

Ya en contexto con la minería y su desarrollo en Perú, es importante también entender los conceptos básicos de la seguridad y los riesgos en las minas peruanas, y conocer sobre los accidentes que ocurren durante la operación minera.

1.3.1. Definición de accidente en mina

Los accidentes son definidos de diferentes maneras; sin embargo, la definición de accidente es un tanto general para el contexto minero, pues estos ocurren en diferentes situaciones y ambientes. Para minería, una definición bastante acertada es la siguiente:

Un accidente se puede definir como un acontecimiento no deseado que puede resultar en daño a las personas, daño a la propiedad o pérdidas en el proceso. Es el resultado del contacto con una sustancia o una fuente de energía por encima de la capacidad límite del cuerpo humano o de la estructura. Desde el punto de vista de las personas, el contacto puede ocasionar un corte, quemadura, abrasión, fractura, o la alteración o interferencia de alguna función normal del cuerpo (cáncer, asbestosis, ahogamiento). Desde el punto de vista de la propiedad, puede ocasionar incendio, destrucción, deformación [18].

Por la naturaleza de la operación minera, las personas en las minas están expuestas a diferentes condiciones inseguras, que podrían terminar en accidentes mortales. Estos son registrados año a año y publicados en reportes por el MINEM. Según esta entidad, las principales causas de los accidentes mencionados son las siguientes:

1. Desprendimiento de rocas
2. Golpes por vehículo motorizado (tránsito)
3. Caídas de personas
4. Atrapado por derrumbe, deslizamiento, soplado de mineral o desmonte
5. Intoxicación, asfixia, absorción, radiaciones
6. Otros tipos

El porcentaje de ocurrencias de estos accidentes durante los últimos 10 años en el Perú se pueden observar en el gráfico de la Figura 7:

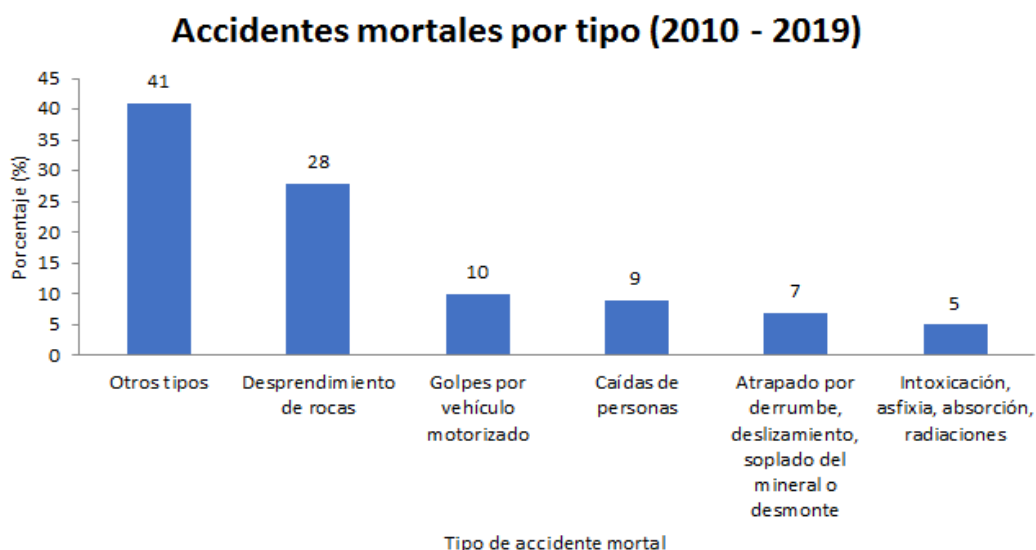


Figura 7. Accidentes por causa en los últimos 10 años (MINEM) [2]

1.3.2. Clasificación de los accidentes de trabajo de acuerdo a la gravedad

Para clasificar los accidentes existen diferentes criterios; pero en Perú se realiza generalmente de acuerdo a la gravedad: incidente (que no produce lesiones ni daños), accidente leve (que produce daños materiales a la propiedad), accidente grave (que produce

lesiones menores, sin incapacidad), accidente muy grave (que produce lesiones incapacitantes, con pérdida de más de tres días) y accidente mortal (que produce el deceso). Tomando esta clasificación, el investigador estadounidense Frank Bird propone la siguiente pirámide de control de riesgos, en la que explica que por cada accidente fatal, se presentan 10 graves, 30 accidentes leves y 600 incidentes [19]. La pirámide se muestra en la Figura 8.

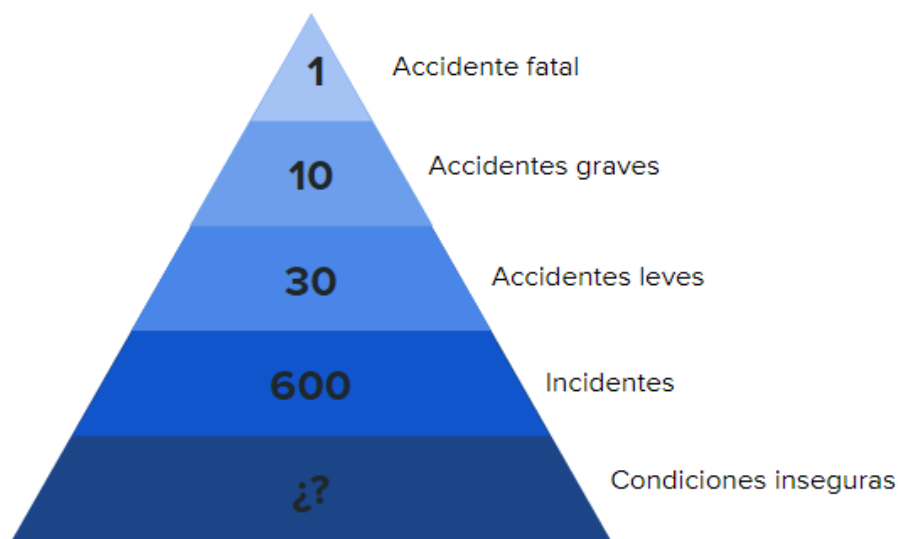


Figura 8. Pirámide Frank Bird (Elaboración propia)

1.4. Políticas

Para que una empresa logre sinergias entre sus diferentes áreas, es importante que todos los colaboradores estén alineados con los principios generales de la empresa, conocidos como políticas. Las políticas de una empresa, además de reflejar el comportamiento que se espera de todos sus colaboradores, marcan las pautas a seguir para realizar adecuadamente los diferentes procesos que ponen en funcionamiento a la empresa.

Existen diferentes tipos de políticas en las empresas; algunas relevantes para el desarrollo de esta tesis son las políticas de seguridad y las del proceso de abastecimiento.

1.4.1. Políticas de seguridad

Un Sistema de Gestión de Seguridad y Salud Ocupacional “consiste en el conjunto de elementos interrelacionados que tienen por finalidad establecer una política de seguridad

y salud ocupacional minera. Eso con la finalidad de prevenir la ocurrencia de incidentes, accidentes y enfermedades ocupacionales, promoviendo una cultura de prevención de riesgos, a partir de la mejora de las condiciones de trabajo, así como los mecanismos y acciones necesarias para alcanzar tales fines con el objeto de crear conciencia sobre el ofrecimiento de buenas condiciones laborales a los trabajadores de esta actividad.” [20]

Dados los riesgos a los que están expuestos los trabajadores mineros y para promover una cultura de prevención de riesgos laborales en la operación, la minería es una de las actividades más reglamentadas y reguladas en el país, prueba de ello es el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería contenido en el Decreto Supremo No. 024-2016-EM [21], el cual establece las normas mínimas para la prevención de los riesgos laborales, siendo que los titulares de las actividades mineras pueden establecer estándares de protección más altos, que mejoren lo previsto en la norma.

Matriz AMEF

En toda empresa existe la posibilidad de que los procesos no salgan de la manera planeada; y cuando esto sucede, las consecuencias pueden ser tan graves como la avería de alguna máquina, la lesión de alguna persona o incluso la muerte; como puede que no afecten a la operación ni las personas involucradas. Siendo tan variable este impacto, cuantificar los riesgos puede ser complicado. Una metodología para ello es el Análisis Modal de Efectos y Fallas (o matriz AMEF); esta trabaja en hallar un indicador de riesgos conocido como “Número Prioritario de Riesgo” (NPR) para las fallas potenciales en cuanto a severidad, ocurrencia y detección. Este indicador es el producto de tres factores: la severidad, la ocurrencia y la detección, cuyos valores son estimados entre 1 y 10 de acuerdo a la prioridad asignada. El producto de estos tres factores será un valor entre 1 y 1000, y calcular el NPR para cada riesgo identificado permitirá priorizar la toma de acciones preventivas o correctivas. Si el valor del NPR en algún riesgo es superior a 100, entonces “es un claro indicador de que deben implementarse acciones de prevención o corrección para evitar la ocurrencia de las fallas, de forma prioritaria.” [22]

En la presente tesis, se utilizó la matriz AMEF para calcular el NPR de las fallas potenciales dentro de mina en el proceso de espera y descarga, y también para calcular el

NPR de las fallas potenciales para las unidades en tránsito. Ambos valores fueron utilizados como indicadores de riesgos.

1.4.2. Políticas de abastecimiento

El abastecimiento de bienes es un proceso realizado en muchas empresas de distintos sectores. Algunas de las actividades realizadas en el proceso de abastecimiento son: la planificación del consumo de los bienes, el requerimiento de la cantidad ya planificada, el transporte del bien desde la empresa proveedora hasta el lugar de uso, el almacenaje del bien y el consumo del mismo.

Una política de abastecimiento implica todos los principios a cumplir en el proceso, como el tiempo de respuesta una vez realizado el requerimiento, el tamaño del lote y la cantidad mínima de lotes pedidos por viaje, la frecuencia entre pedidos, etc.

1.5. Implementación de un *hub* logístico

Dependiendo de la operación, un *hub* logístico puede ser implementado en diferentes cadenas de suministros en distintos sectores.

1.5.1. Definición de *hub* logístico

Un *hub* logístico es definido como un área en la que “se realizan actividades relativas al transporte, logística y distribución de mercaderías o *commodities* por diferentes agentes dentro de una cadena de suministro” [23]. La finalidad de un *hub* logístico es reunir y organizar las cargas que llegan de diferentes destinos para su posterior redistribución de manera efectiva. El *layout* de un *hub* logístico debe contar con una correcta distribución de áreas, que pueden ser conformadas por: [24]

- Almacenes (pueden estar automatizados)
- Centros de distribución (pueden estar automatizados)
- Zonas para *crossdocking*, clasificación y *packaging*.
- Muelles de carga y descarga
- Instalaciones administrativas

Algunas de las ventajas que un *hub* logístico puede brindar dentro de una cadena de suministro son:

- Viabilidad para realizar nuevos proyectos de manera sostenible.
- Generación de empleo asociado a las operaciones logísticas.
- Generación entornos de negocios de bajo riesgo y acuerdos de libre circulación de mercancías.
- Reducción de los riesgos ya existentes asociados a la ruta y la pernoctación de unidades en mina.
- Ahorro de costos de *stand by*.
- Eficiencia en las horas hombre trabajadas (FTE).

1.5.2. Clasificación y estructura de un *hub* logístico

Dependiendo de la complejidad de la cadena de suministro existen distintas clasificaciones para un *hub* logístico. Según los expertos Huber, Luft, Klauenberg y Thaller [25] un *hub* logístico se clasifica de la siguiente manera: (1) centro de distribución centralizado, (2) plataforma logística multimodal y (3) zona logística.

Un centro de distribución centralizado es aquel que busca mejorar la cobertura de las mercancías o *commodities* ingresados. Su función principal es recopilar las unidades o lotes y distribuirlos según lo requerido con una estrategia específica (ejemplo: estrategia FIFO), controlando el inventario. Por otro lado, una plataforma logística multimodal es un *hub* logístico en el que intervienen distintos tipos de transporte y la importancia de la mercancía recae en el producto por su valor, dejando en segundo plano la manera en la que es distribuido. Por lo general, esta clasificación de *hub* funciona en los puertos y busca aumentar los ingresos económicos a través de las rutas internacionales [26]. Finalmente, una zona logística funciona con carga aérea y portuaria, y cuenta con más de un tipo de transporte, lo que permite establecer planes de ejecución más complejos para la distribución.

Los *hub* logísticos se dividen en dos tipos según la cantidad de modos de transporte involucrados. El primer tipo abarca solo un modo de transporte y se desempeña

principalmente en el transporte terrestre, distribuyendo las mercaderías o *commodities* en unidades terrestres. El segundo tipo abarca más de un modo de transporte (multicanales), y debe contar con el equipo adecuado para manipular la mercadería y con puntos de acopio según especificaciones.

En la cadena de suministro de una mina es posible encontrar almacenes, áreas de almacenamiento, espacios de clasificación de carga y centros de distribución, etc. En esta tesis se propone utilizar un *hub* logístico de tipo unimodal terrestre como centro de distribución centralizado para la mina Tambomayo.

1.5.3. Objetivos de un *hub* logístico en la cadena de suministro de una mina

Un *hub* logístico en la cadena de suministro de una mina tiene principalmente el objetivo de cumplir una logística determinada para lograr la correcta distribución y abastecimiento de unidades para la mina, y brindar además un beneficio económico que sea sostenible; es decir, su funcionamiento debería reducir los costos de transporte y operaciones derivadas. Entre los objetivos secundarios de un *hub* logístico, algunos son: (1) la planificación de entrada y salida de unidades para limitar los riesgos generados por la circulación de unidades en ruta y dentro de la mina, y (2) la reducción de tiempos en la respuesta a cualquier imprevisto como: solicitudes urgentes de unidades, incidentes y accidentes ocurridos en la ruta hacia la mina.

En otras palabras, el propósito del *hub* logístico es optimizar la cadena de suministros, facilitar la organización del trabajo, sincronizar las partes (almacén, planeamiento geomecánico, área logística y proveedores) y utilizar de manera eficiente los recursos disponibles: y de esta manera, alcanzar los parámetros de eficiencia que se traducen en la continuidad de las operaciones de la mina, garantizando el control de las operaciones de la cadena de suministros.

1.5.4. Características y funciones de un *hub* logístico como centro de distribución centralizado

Un *hub* logístico como centro de distribución centralizado posee una infraestructura industrial para el paso y retención de unidades, instalaciones con área de maniobras que

permitan un adecuado desempeño de las operaciones, capacidad para conectarse con distintos puntos de llegada, poblaciones aledañas y otros *hubs*. Además, para la correcta ejecución de sus funciones debe contar con información actualizada y certera, y un adecuado sistema de comunicaciones que funcione en conexión con las partes involucradas (choferes, centro de control en el *hub*), mediante radios, GPS, entre otros.

De acuerdo a estas características y a la cadena de suministros de la mina Tambomayo, el *hub* logístico propuesto debe cumplir responsabilidades y funciones para la viabilidad y futura proyección del *hub* y la mina. Las funciones principales del *hub* serían las siguientes:

- Programar el envío de unidades de cemento para abastecer a la mina, previa coordinación con las áreas responsables de la mina y las áreas administrativas de la empresa Buenaventura.
- Gestionar y controlar los requerimientos emitidos por la mina según la demanda real de los insumos, además de las entradas y salidas de unidades al *hub*, manteniendo el área de descarga descongestionada.
- Supervisar la carga de las unidades previamente a su llegada a mina, lo cual implica asegurar que cada unidad cuente con los precintos correctamente cerrados y los equipamientos de emergencia correspondientes, y que los choferes se encuentren en adecuadas condiciones para el traslado a mina.
- Asegurar una respuesta inmediata ante cualquier accidente que ocurra en la ruta hacia mina, utilizando como apoyo un container de emergencia equipado para atender todo tipo de accidentes.
- Coordinar la llegada y salida de unidades, informando las condiciones de la ruta y sus complicaciones.
- Revisar los documentos de las unidades e informar a la mina en caso exista cualquier eventualidad.

1.5.5. Criterios de implementación de un *hub* logístico

Para realizar con eficacia la implementación de un *hub* logístico para la cadena de suministro de la UM Tambomayo, se buscará aplicar adecuadamente los recursos disponibles. Para ello serán considerados ciertos criterios como la capacidad que el *hub* debería tener, que debe ser delimitada de acuerdo a las necesidades de abastecimiento del destino final; en este caso, la unidad minera Tambomayo. Otro criterio determinante es el control de los costos administrativos, costos del personal y costos de implementación e inversión inicial; y finalmente, un criterio a tomar en cuenta al diseñar un *hub* logístico es la ubicación, considerando factores como la complejidad del terreno, la altitud y las poblaciones cercanas a la zona.

Factores Críticos de Éxito (FCE) en la implementación de un *hub* logístico

La métrica de factores críticos de éxito está “dirigida a identificar aquellos factores del entorno cuyo funcionamiento adecuado o evolución favorable permitirán la implantación con éxito de una estrategia determinada.” [27] Teniendo conocimiento de los criterios evaluados para la implementación del *hub* (capacidad, costos y ubicación) se debe determinar los FCE’s para cada uno.

En relación a los costos, el factor crítico es el cumplimiento del presupuesto, basado en los costos plasmados en el CAPEX del proyecto. Otro factor crítico es el tiempo de recuperación de lo invertido en la implementación del *hub*: mientras menor sea este tiempo, más factible será la implementación del *hub*. Estos factores deben ser calculados de manera precisa si se desea tener éxito en la implementación. De lo contrario, podría pasar como en Hong Kong, que se desarrolló el *hub* logístico más costoso de la historia (superando los 345 millones de euros de inversión); sin embargo, no se generó la rentabilidad objetivo en el alcance de 5 años (propuesto por la empresa) y los resultados deseados no fueron alcanzados. [28]

Además de la visualización del plano financiero, se debe determinar 5 puntos clave que van de la mano en cuanto a la planificación y ubicación del *hub* logístico: (1) la infraestructura y distribución, (2) conexiones de entrada y salida, (3) futuro desarrollo y

sostenibilidad, (4) condiciones de contrato del terreno y por último (5) el cumplimiento legal. [29]

1.5.6. Retos en la implementación de un *hub* logístico

Los principales retos en la implementación y el desarrollo de un *hub* logístico en la cadena de suministro de la mina Tambomayo son los siguientes: (1) la corrección de la coordinación entre las áreas en mina y las áreas administrativas que se encuentran en Lima, (2) la adaptación del *hub* para el desarrollo de más de una operación, (3) la gestión del personal que trabajará en el *hub*, (4) la asignación de responsables de la gestión de las operaciones en el *hub* y (5) la integración de las actividades a realizar en el *hub* con las comunidades locales.

El primer reto mencionado conlleva a reestructurar la comunicación entre las partes con el fin de mejorar la veracidad de la información. El *hub* logístico sería utilizado para la operación de abastecimiento de cemento a la mina Tambomayo; sin embargo, está proyectado a ser el centro de distribución centralizado de más de un *commodity*, lo cual podría complicar el desarrollo de las operaciones realizadas en él.

Es importante establecer las políticas con las que se trabajará en el *hub* y asegurar su cumplimiento por parte del personal; y así facilitar el cumplimiento del tercer y cuarto reto mencionado. Finalmente, la integración de las actividades a realizar en el *hub* con las comunidades locales puede ser cubierta dado que los pobladores de estas comunidades podrían ser contratados para cumplir las labores en el *hub*, y además los choferes que tengan que pernoctar en el *hub* pueden consumir en las zonas aledañas, generando así empleo y movimiento de la economía en las comunidades locales.

1.6. Variabilidad en la demanda de suministros en una mina

Una de las razones por las cuales se realizan solicitudes innecesarias de unidades es la variabilidad de la demanda de los insumos. Esto ocurre sobretodo en el consumo de cemento, pues como ya fue mencionado, es usado en el chocreteado (*shootcrete*). Esta operación es realizada en las etapas de exploración y explotación, y el progreso de la misma es impredecible, por lo que no se puede pronosticar el consumo de los insumos utilizados.

Además, la mina Tambomayo se encuentra en una zona alta de la sierra y su climatología presenta truenos, tormentas, friajes y heladas, por lo que en ocasiones la mina entra en “alerta roja”. La “alerta roja” prohíbe la continuidad de las operaciones en la mina en momentos en que los riesgos de accidentes son altos; por ejemplo, durante una tormenta. Detener la producción por alerta roja significa también un cambio en la demanda que no puede ser anticipado.

1.7. Simulación de escenarios

En la búsqueda de conocer los posibles resultados en los diferentes posibles escenarios para la toma de una decisión, el ser humano ha desarrollado la simulación. Esta es definida como “la imitación de la operación de un proceso o sistema del mundo real” [30] o “el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y realizar experimentos con el modelo con el fin de comprender el comportamiento del sistema y evaluación de diversas estrategias para el funcionamiento de los sistemas.” [30] En otras palabras, la simulación es una manera de reproducir los escenarios sin la necesidad de aplicarlos en la vida real, de manera que se obtienen resultados mientras se ahorra el tiempo, el dinero y los recursos que serían utilizados en la implementación.

Una simulación discreta suele simular procesos estocásticos; es decir, eventos que ocurren aleatoriamente en la línea de tiempo. Un modelo de simulación general se comprende de n variables de entrada (x_1, x_2, \dots, x_n) y m variables de salida ($f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)$) o (y_1, y_2, \dots, y_m). (Ver Figura 9) [31]

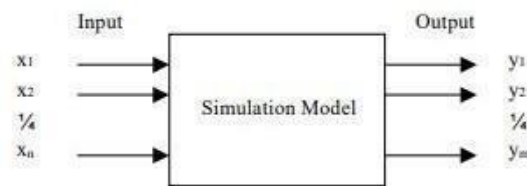


Figura 9. Modelos de simulación [31]

Además, los procesos simulados pueden ser optimizados para obtener mejores resultados según criterios determinados. La optimización de los procesos simulados implica encontrar la configuración óptima de las variables de entrada, es decir, los valores de x_1, x_2, \dots, x_n , que optimizan las variables de salida. [32]

Existen diferentes modelos para la optimización de una simulación (ver Figura 10), uno de ellos es la comparación múltiple. Este implica la alteración de los valores de las variables de entrada en los distintos escenarios utilizando como retroalimentación los valores de las variables de salida. Esta iteración puede ser realizada manualmente en la construcción del modelo, hasta conseguir los inputs con mejores resultados en la cadena.

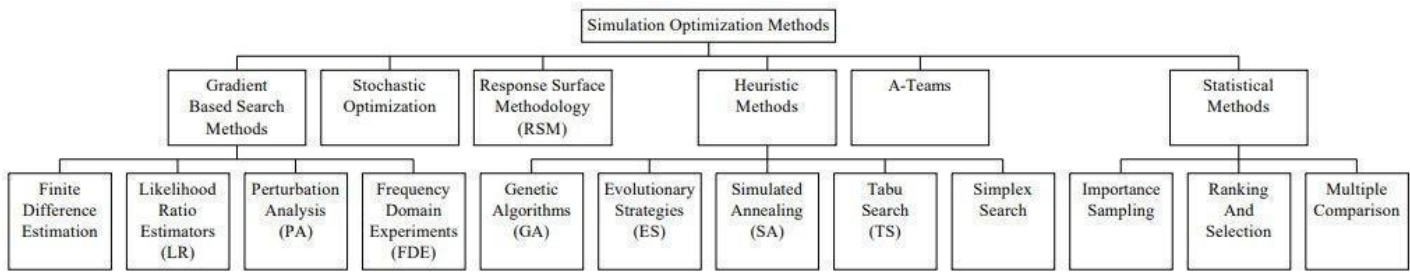


Figura 10. Métodos en Modelos de optimización de simulación [32]

1.7.1. Herramientas de simulación

Es posible realizar una simulación siguiendo los siguientes pasos: (1) Observar el proceso, (2) Identificar metas-métricas, (3) Identificar posibles variables de decisión, (4) Lógica del proceso (abstracción), (5) Recolección de tiempos y valores de entrada, (6) Inferir distribuciones de probabilidad, (7) Simular, (8) Validar, (9) Reporte de métricas, (10) Correr más escenarios y (Recomendar decisiones) [33].

Para facilitar el desarrollo de estos 10 pasos, se puede utilizar diferentes herramientas que varían desde metodologías hasta el uso de algún software para facilitar el cálculo de los indicadores o para realizar la estructura de la simulación. Un lenguaje de programación útil para la simulación de escenarios es el software Python, el cual será utilizado en la presente tesis.

Lenguaje de programación Python

Python es un lenguaje de programación interpretado orientado a objetos, procesos, modelos, entre otros, todos semánticos de alto nivel. La estructura de datos integrados con tipo y enlaces dinámicos hacen que sus aplicaciones puedan adaptar situaciones reales a un modelo digital mediante simulaciones que contengan variables con datos reales. De esta manera, se puede trabajar con la combinación de paquetes, librerías, *classes* y otras

herramientas de Python que permiten crear la estructura del modelo de simulación. El *user guide* de Python indica que la combinación de paquetes “permite llevar el poder del modelado y la simulación a distintos tipos de negocios.” [34] Los paquetes utilizados en la simulación son: Simpy, Numpy, Itertools, Random, Pandas, Math, entre otros.

Los posibles escenarios simulados en Python incluyen:

- Análisis de diferentes cadenas de suministro que abarcan actividades como almacenamiento, transporte y sistemas logísticos.
- Análisis a detallado de cualquier tipo de sistema de fabricación, incluida la manipulación de materiales y componentes.
- Análisis de servicios complejos al cliente y sistemas de gestión de clientes.
- Análisis predictivo de la eficiencia y rendimiento del sistema con base en indicadores claves o KPI’s como: costos, tiempo de ciclo, tiempos en el proceso, etc.
- Identificación de los cuellos de botella del proceso, presentando indicadores de acumulación de colas y uso excesivo de recursos.

1.8. Toma de decisiones bajo incertidumbre

Diariamente las empresas enfrentan situaciones de toma de decisiones en las que un recurso muy importante es la información que poseen. “La gestión de la incertidumbre es un desafío principal dentro de la gestión de la cadena de suministro. Por lo tanto, se espera que los métodos de planificación de la cadena de suministro que no incluyen la incertidumbre obtengan resultados inferiores si se comparan con los modelos que lo formalizan implícitamente” [35]. Dado que las decisiones están condicionadas al desconocimiento de lo que pueda suceder o del impacto de variables que no pueden ser controladas, la calidad de la decisión no depende de los resultados.

“En muchas decisiones, las consecuencias de los cursos de acción alternativos no pueden predecirse con certeza. Una compañía que está considerando el lanzamiento de un nuevo producto no estará segura de cuán exitoso será el producto, mientras que un inversionista en el mercado de valores generalmente no estará seguro de los retornos que se

generarán si se elige una inversión en particular” [36]. Es posible entonces haber tomado correctamente una decisión, aprovechando todos los recursos e información disponibles, y que el resultado sea producto de situaciones que no se pueden predecir con certeza. Los escenarios mencionados son ciertamente comparables con la implementación de un *hub* logístico como parte de un nuevo modelo de operación para la cadena de suministro de la UM Tambomayo, pues existe incertidumbre en variables como la demanda de producción, el tiempo de las unidades en tránsito, entre otras.

1.8.1. Análisis de decisión multicriterio (MCDA)

“El MCDA es la actividad de la persona que, mediante el uso de un modelo explícito pero no necesariamente completamente formalizado, ayuda a obtener elementos de respuestas a las preguntas planteadas por una parte interesada en una decisión y, por lo general, a recomendar o simplemente favorecer un comportamiento que aumentará la consistencia entre la evolución del proceso, los objetivos y el sistema de valores interesado” [37].

MCDA tiene como objetivo establecer, sobre bases científicas reconocidas, con referencia a hipótesis de trabajo, formulaciones de proposiciones que luego son sometidas al juicio de un tomador de decisiones y/o los diversos actores involucrados en el proceso de toma de decisiones.

MCDA puede ser utilizado para [38]:

- Analizar el contexto de toma de decisiones mediante la identificación de los actores, las diversas posibilidades de acción, sus consecuencias y lo que se arriesga al tomar una decisión u otra.
- Elaborar recomendaciones utilizando resultados tomados de modelos y procedimientos computacionales dentro del marco de una hipótesis de trabajo.
- Identificar las variables del proceso que serán analizadas para dar legitimidad a la decisión tomada.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

La propuesta de la presente tesis es un nuevo modelo de operación de abastecimiento de cemento para la mina Tambomayo. Como parte de la metodología, se seguirá la siguiente secuencia de pasos:

1. Recopilar información:

Se recopiló información tanto de la empresa transportista como de la minera. La empresa transportista brindó los datos históricos detallados de viajes desde enero de 2019 hasta marzo de 2020. En los detalles de cada viaje, las variables que luego serían analizadas son: fecha de salida de Yura, fecha y hora de llegada a mina, fecha y hora de descarga, y fecha de salida de mina. Por otro lado, la minera brindó información del año 2019 sobre los costos en cemento de las minas Tambomayo y Orcopampa, y el porcentaje de ventas que ambas minas representan en la empresa Buenaventura y el grupo empresarial al que pertenece.

2. Analizar datos:

Se realizó un análisis exhaustivo de la información detallada de cada viaje. Primero, se buscó relacionar algunas de las variables para hallar tendencias o correlaciones entre ellas. Se analizaron también las distribuciones del tiempo entre cada salida de Yura, el tiempo entre llegadas a mina, el tiempo entre descargas y el tiempo entre cada salida de mina, así como las distribuciones del tiempo de cola (desde la llegada a mina hasta la descarga) y el tiempo total del proceso (desde la salida de Yura hasta la salida de mina).

Se realizó también el análisis de las siguientes variables: cantidad de unidades descargadas por día, cantidad de unidades en cola por día y cantidad de unidades en tránsito por día. Se identificó la distribución de cada variable y para asegurar que

esta se ajuste a la data real, se realizó para cada distribución una prueba de verosimilitud y se aplicó una prueba de bondad de ajuste.

3. Formular hipótesis

Con base en la información analizada, fueron formuladas hipótesis con respecto a la viabilidad de implementar un *hub* logístico (ahorros potenciales, reducción de riesgos y tiempo de respuesta, capacidad necesaria del *hub* para cubrir la demanda)

4. Simular escenarios

Se utilizó el lenguaje Python para realizar la simulación de dos configuraciones: uno de la cadena de suministro actual y uno de la misma implementando un *hub* logístico. Para que ambas configuraciones sean en base a datos reales, se colocó como inputs en la simulación los valores de la información analizada anteriormente.

5. Comparar y analizar resultados

La comparación de escenarios se realiza para encontrar indicadores que permitan tomar las mejores decisiones según criterios determinados. Los resultados de ambas simulaciones fueron analizados y comparados utilizando MCDA. Los indicadores comparados para ambos escenarios fueron: el tiempo de respuesta ante solicitudes de la mina (horas), la cobertura de las unidades como stock (horas), los costos totales por *stand by* (soles) y los riesgos asociados a estos. Estos indicadores fueron estimados luego de repetir la simulación una cantidad de veces determinada por el ancho del intervalo de confianza delimitado.

6. Validar hipótesis y plantear recomendaciones

El análisis de los resultados validará las hipótesis formuladas anteriormente. A partir de ello, se plantearán recomendaciones a las empresas con respecto a la implementación del *hub*.

Para el desarrollo de la simulación se tomó como base un artículo que demuestra la utilidad de las simulaciones por computadora para la gestión del abastecimiento y tránsito en las minas y su control de transporte. El autor, Sebastián Chęciński,

realizó una simulación en 3D del transporte minero prestando especial atención a la formación de corrientes de vehículos pesados y a los puntos de concentración de tráfico de camiones. [39]

2.1. Variables de decisión

Además de las decisiones a ser tomadas con respecto a la operación, de ser implementado el *hub* logístico hay otras variables que deben ser definidas:

1. La localización del *hub* logístico, que una vez definida determinará el tiempo de respuesta a las solicitudes de mina, y las poblaciones aledañas y los caminos que se pueden tomar en caso de una emergencia.
2. El dimensionamiento y *layout* del *hub*, con base en el aforo de unidades, variable que será determinada con los resultados de la simulación del escenario con *hub*.

Estas variables no determinarán si la implementación del *hub* es viable o no, pero deben ser definidas de manera meticulosa si es que se toma la decisión de implementarlo.

2.2. Variables contextuales e independientes

Existen variables que pueden afectar el proceso de abastecimiento a mina pero que no pueden ser manipuladas, estas variables son llamadas variables contextuales. Las variables contextuales identificadas en el proceso de abastecimiento a mina son: (1) la climatología, (2) la variabilidad de la demanda mencionada anteriormente y (3) los problemas sociales. Ninguna de estas tres variables puede ser controlada, y las tres pueden afectar el proceso.

La climatología es un factor crítico en el abastecimiento a la mina que afecta tanto el transporte de insumos (dado que según las condiciones del clima el estado de la ruta va a variar ya sea esté fangoso, helado, seco, etc) como la operación en mina (pues eventos climáticos como tormentas pueden impedir la continuación de la operación en mina). Esto trae consigo la segunda variable mencionada: la variabilidad de la demanda, dado que un paro en la operación puede alterar el requerimiento programado de insumos. Esta variable no puede ser controlada además porque depende de las etapas de exploración y explotación, que como fue mencionado anteriormente el progreso es impredecible. Finalmente, los paros

sociales suceden habitualmente en la ruta hacia la mina, donde pobladores de las comunidades aledañas restringen o impiden el paso a las unidades que se dirigen a la unidad minera, afectando el tiempo de respuesta a la mina.

Por otro lado, las variables independientes son aquellas que cambian o pueden ser controladas para estudiar sus efectos en la variable dependiente. En el proceso trabajado, las variables independientes son las analizadas en el segundo paso de la metodología: el tiempo entre cada salida de Yura, el tiempo entre llegadas a mina, el tiempo entre descargas, el tiempo entre cada salida de mina, el tiempo de cola (desde la llegada a mina hasta la descarga) y el tiempo total del proceso (desde la salida de Yura hasta la salida de mina).

2.3. Fuentes de información e instrumentos de medición

La presente tesis fue basada en información obtenida principalmente de la empresa FC Transportes y soluciones especiales S.A.C y la empresa minera Buenaventura. Para salvaguardar el origen de los datos se aseguró a las empresas no compartir los documentos entregados a entidades ajenas al estudio de la tesis. Los archivos fueron recibidos en diferentes formatos, sea bases de datos, documentos de word y excel, y correos. Algunos de los archivos recibidos son:

1. Hojas de ruta
2. Programación histórica del periodo enero - junio 2019 de la empresa FC Transportes.
3. Histórico de *stand by* de unidades de cemento del periodo enero - junio 2019.
4. Entrevistas a conductores de la empresa FC Transportes y Soluciones S.A.C.
5. Detalle de costos en cemento de la empresa Buenaventura para las unidades mineras Tambomayo y Orcopampa en el periodo enero - junio 2018, y el porcentaje de estos frente a los costos de suministros.
6. Porcentaje de ventas que las unidades mineras Tambomayo y Orcopampa representan con respecto a la empresa Buenaventura

Cabe resaltar que el transporte de cemento a Tambomayo se trabajó con dos empresas transportistas. Sin embargo, esta tesis sólo considera la información a la que fue posible acceder.

2.4. Toma de decisiones

Luego de realizar la simulación, se tomaron las decisiones en cuanto a las variables mencionadas. Cada una de estas decisiones afectará la cadena de suministro, lo cual lleva a tomar una decisión que englobe todas ellas para que la propuesta sea viable y sostenible. Entonces, con una visión de todo el panorama, incluyendo las variables de decisión, las contextuales y los resultados de la simulación, se utilizará la metodología de análisis de decisión multicriterio para tomar la decisión más acertada.

CAPÍTULO III

RESULTADOS

Los resultados de esta tesis fueron obtenidos luego del análisis de la información recopilada y de la creación, análisis y comparación de escenarios con el modelo de simulación.

3.1. Análisis de datos

Se trabajó con los históricos de viajes del periodo enero a junio de 2019. Los datos obtenidos presentan información de diferentes variables, incluyendo la fecha de salida de Yura, la fecha y hora de llegada a mina, cantidad de cemento transportado, fecha y hora de descarga, entre otras variables.

Luego de realizar un análisis exploratorio, se llegó a la conclusión de que la frecuencia de requerimiento de cemento es variable a lo largo de todos los meses, y que la cantidad de días de *stand by* no depende de la cantidad de viajes realizados, como se observa en el Figura 11.

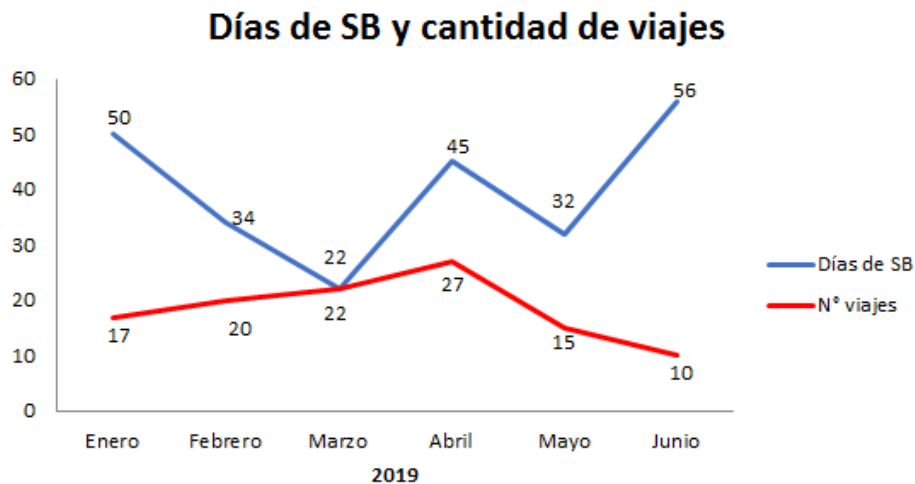


Figura 11. Días de *stand by* y cantidad de viajes

Además, luego de entrevistar a los responsables de la empresa transportista, se concluyó que la variabilidad de la cantidad de unidades de cemento requeridas también depende de factores externos como manifestaciones sociales, como es el caso del mes de agosto, en que la población de Caylloma realizó un paro en la ruta hacia mina lo cual redujo la cantidad de unidades que pasaron por la ruta hacia mina; o como el cambio de proveedor de servicios de almacenamiento y tratamiento de cemento, como sucedió el mes de noviembre, que se realizó el cambio de la empresa Robocon a la empresa Incimmet, causando que en los últimos meses del año 2019 solo sea registrada una cantidad mínima de viajes.

Con la información obtenida, se calculó que el monto perdido por *stand by* durante el periodo enero 2019 - junio 2019 fue S/.119,000.00, y generó un aumento de 24% en el costo de transporte. Al representar un costo importante, se vio por conveniente realizar un análisis de la cantidad de unidades que la mina solicita y la cantidad de unidades que realmente necesita.

Para el análisis efectivo de lo mencionado en el párrafo anterior, se tomó información de la cantidad de unidades de cemento descargadas diariamente, asumiendo que esto representa la demanda de cemento. El resultado mostró que no hay una descarga diaria de unidades: el 51% de los días no había descargas. El resto de días, se descargó en su mayoría una unidad y muy pocas veces dos unidades (10% de los 181 días); y solamente una vez se descargaron 3 unidades. Esta información se muestra en el Figura 12.

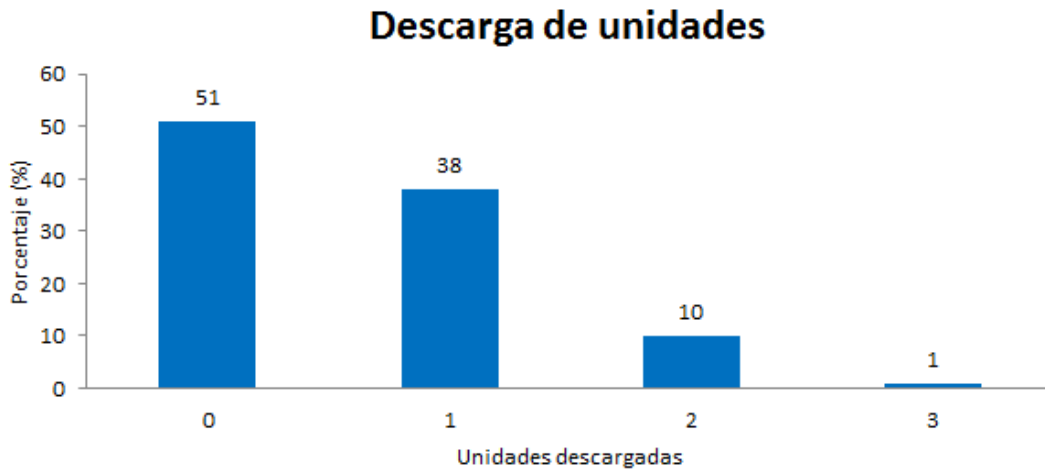


Figura 12. Probabilidad de unidades descargadas por día

Luego de realizar la evaluación de unidades descargadas por día, se procedió a revisar la cantidad de unidades en cola y la cantidad de unidades en tránsito. Analizando estas dos variables se observó que han ocurrido casos donde la cantidad de unidades en cola llegó a ser 6 el mismo día. Lo mismo ocurrió con las unidades en tránsito: esta variable llegó a ser 6 el mismo día. Esto se observa en el Figura 13:

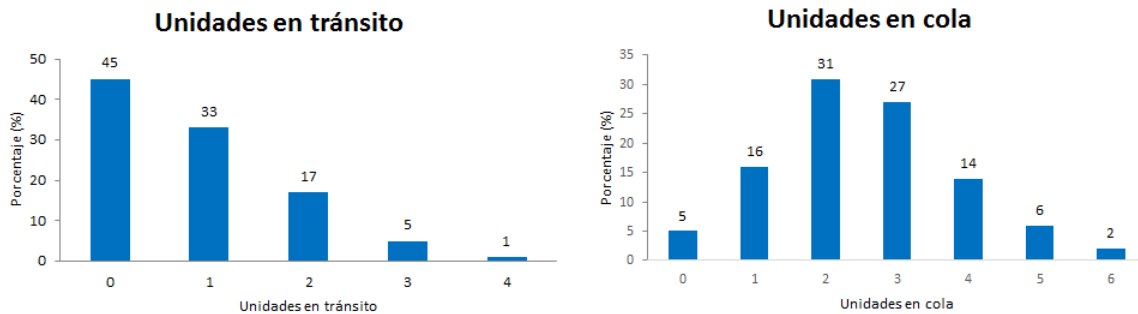


Figura 13. Análisis de unidades en cadena

Siendo que la cantidad de unidades que serán descargadas por día varía entre 0 y 1, y algunos casos 2, es inevitable preguntarse: ¿por qué la mina está emitiendo tantos pedidos? Una hipótesis está relacionada al tiempo de ruta desde Yura a la mina. A continuación, en la Figura 14 se presenta un gráfico en el que se muestra el tiempo que se han demorado los camiones en la ruta en el periodo trabajado:

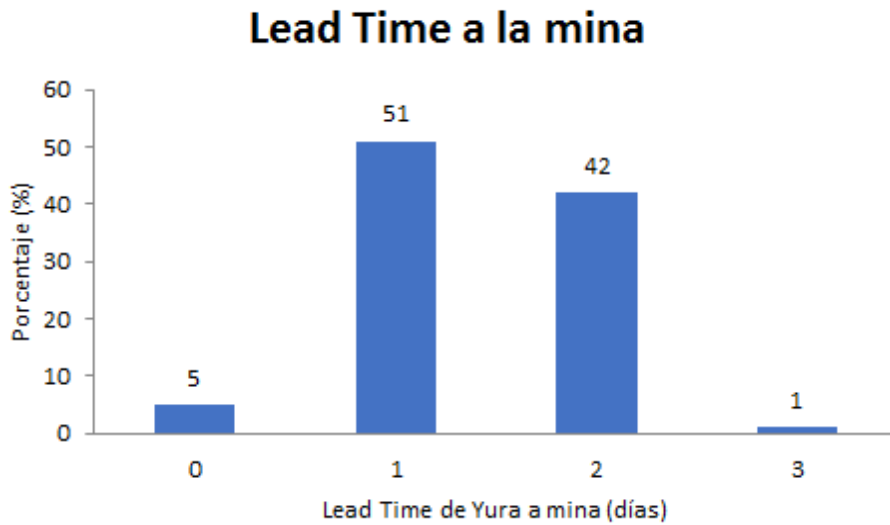


Figura 14. Tiempo de ruta a mina

Más del 90% de las veces, el tiempo de ruta ha variado entre 1 y 2 días. En la simulación, el tiempo de ruta se considera un día y medio, pues luego de conversaciones con los choferes y su conocimiento sobre el tiempo real de la ruta, y considerando los resultados del análisis de esta variable, un día y medio representa el tiempo promedio de ruta.

Entonces, la primera hipótesis es que las áreas de Tambomayo solicitan unidades para utilizarlas como stock, pues las mantienen dentro de mina para contar con ellas cuando sea necesario y evitar la incertidumbre de no tener cemento, ya que las unidades pueden demorarse más de dos días en llegar.

Para realizar la simulación se utilizarán dos variables aleatorias discretas como inputs. Estas fueron analizadas en cuanto a la probabilidad de ocurrencia, ya que al ser variables aleatorias discretas empíricas que toman menos de 20 valores, no se adaptan a ninguna distribución conocida. A continuación se muestra el resultado del análisis de las dos variables:

- Tiempo entre pedidos que salen de Yura (días), en la Tabla 3.

Tiempo entre pedidos	
Tiempo en s	Probabilidad
43200	0.15
64800	0.085
86400	0.35
129600	0.09
172800	0.17
216000	0.1
259200	0.05
302400	0.005

Tabla 3. Días entre salidas de Yura

- Tiempo entre unidades descargadas, en la Tabla 4.

Tiempo entre descargas	
Tiempo en s	Probabilidad
43200	0.22
86400	0.36
129600	0.04
172800	0.22
216000	0.03
259200	0.08
302400	0.02
345600	0.03

Tabla 4. Unidades descargadas por día

3.2. Simulación de escenarios

Una vez analizadas las variables y luego de determinar las distribuciones y parámetros de estas, se realizará un modelo de simulación con las dos configuraciones a ser comparadas: la cadena de suministro del abastecimiento de cemento con el *hub* (escenario 0) y sin el *hub* (escenario 1). A continuación, en las Figuras 15 y 16 se presenta el diagrama de los dos escenarios a simular:

Escenario 0: Sin *hub* (Figura 15).

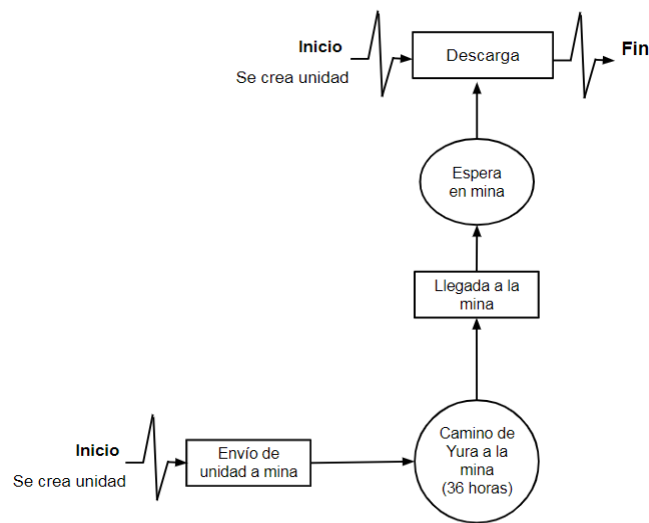


Figura 15. Bosquejo de escenario sin *hub*

Se crea un pedido y la unidad cargada se dirige a mina y llega en un día y medio. Una vez en mina, la unidad debe hacer cola hasta realizar la descarga. Este tiempo de cola está condicionado por el tiempo entre las descargas, variable que funciona como input junto con el tiempo entre pedidos.

Escenario 1: Con *hub* (Figura 16).

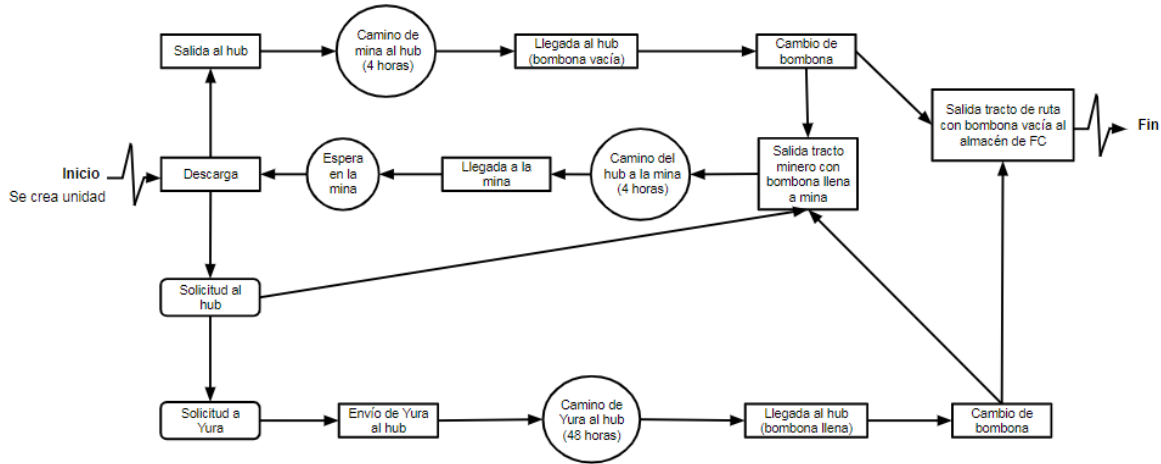


Figura 16. Bosquejo de escenario con *hub*

Una unidad consta de un tracto y una bombona. La bombona es donde se transporta el material, y el tracto es la parte de la unidad que conduce el chofer, que carga la bombona. El tracto puede costar 9 veces lo que cuesta la bombona, por lo tanto el costo de *stand by* va asociado a tener los tractos parados, no por las bombonas. Entonces, para disminuir los costos de *stand by*, se aplicará el desenganche. Esto quiere decir que saldrá una unidad de Yura, y al llegar al *hub* el tracto dejará la bombona llena, pernoctará en el *hub* y se llevará una vacía al almacén de FC Transportes. Serán asignados solamente dos tractos para realizar el transporte del *hub* a la mina y de la mina al *hub*, pues se ha comprobado que no se necesitan más.

Así, la bombona que está en mina será descargada, y luego llevada vacía al *hub*. Los tractos 1 y 2 realizarán el envío de bombonas llenas a la mina, la descarga y el envío de las bombonas vacías de regreso al *hub*; mientras que los otros tractos realizarán únicamente el transporte de Yura al *hub* con la bombona llena y el transporte del *hub* al almacén de FC Transportes con la bombona vacía.

Cuando la bombona es descargada, la unidad completa se dirige al *hub* con la bombona vacía, mientras que el *hub* envía el otro tracto con una bombona llena a la mina, y solicita una de Yura para completar su capacidad. La unidad enviada a mina llegará luego

de 4 horas, mismo tiempo que demora en llegar la unidad con la bombona vacía al *hub*. Mientras que el tiempo que se demora en llegar la unidad de Yura serán 2 días, considerando 12 horas en la planificación y carga de unidades y 36 de camino. Cuando la unidad llega a la mina para dejar la bombona llena, la bombona vacía ya está lista para ser retirada.

3.3. Análisis y comparación de escenarios

Para corroborar el impacto de un *hub* serán comparados 3 indicadores: tiempo de respuesta a la mina, costo por *stand by*, y riesgos asociados a este. Los resultados de la simulación fueron mostrados en *dataframes* extraídos en excel con las columnas necesarias para corroborar el correcto comportamiento de las unidades en la cadena, y así poder comparar los resultados de ambos escenarios. Además, con el resultado de la simulación se pudo definir la capacidad del *hub* y las políticas que deben ser seguidas para el correcto funcionamiento del modelo de operación.

El resultado indicó lo siguiente:

Tiempo de respuesta: En el escenario sin *hub* el tiempo de respuesta es de 48 horas, mientras que en el escenario con *hub* el tiempo de respuesta se ve drásticamente reducido a 4 horas, lo cual representa una mejora sustancial para la operación. Además, el transporte ya no se vería afectado por los inconvenientes que puedan ser presentados en la ruta desde Yura. El resultado se muestra en la Figura 17.

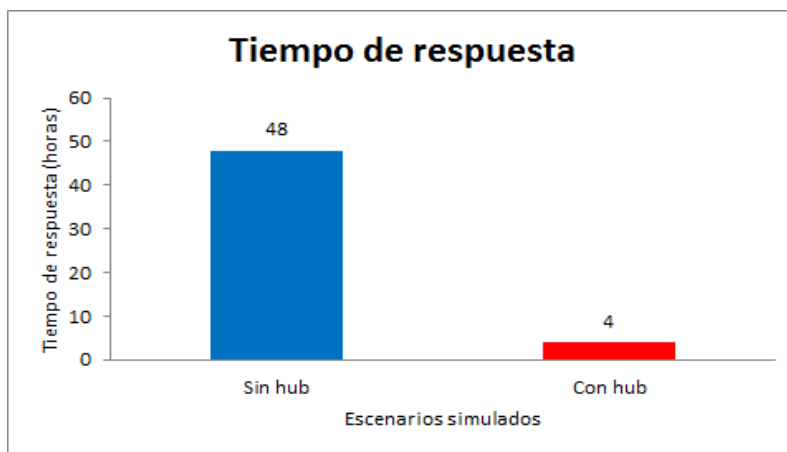


Figura 17. Tiempo de respuesta a mina

Costo de stand by: Los costos de *stand by* en mina se reducen considerablemente. Dado que se trabaja con desenganche y solo se cobra *stand by* a los tractos, el costo se reduce en un 80%, pasando de ser S/.122,000.00 en el escenario sin *hub* a S/:24,500.00 en el escenario con *hub*. El resultado se muestra en la Figura 18.

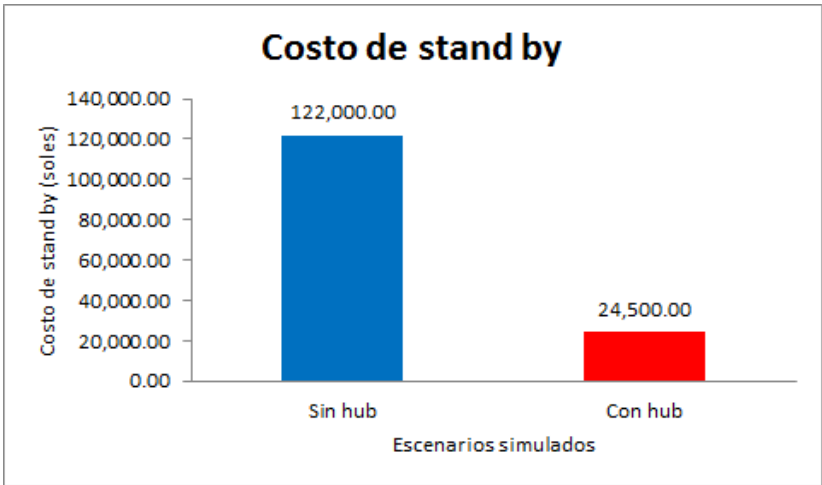


Figura 18. Costos de *stand by*

Riesgos asociados a la estadía en mina: Los riesgos asociados a las unidades y sus operarios dentro de mina se reducen notoriamente. Pasando de ser un promedio de 1087 a 796. El resultado se muestra en la Figura 19. Para calcular estos valores se realizó una matriz AMEF del proceso de descarga de cemento en el silo y se utilizó el NPR más alto (Anexo 3).

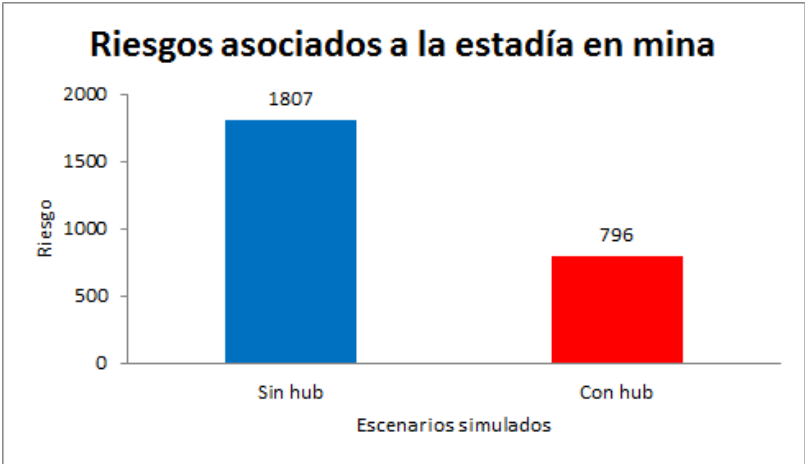


Figura 19. Riesgos por estadía en mina

Cabe resaltar que los choferes no solo se exponen a riesgos dentro de mina sino también en el trayecto. Si bien un *hub* no disminuye los riesgos asociados a la ruta, se realizó una matriz AMEF de la ruta a mina (Anexo 4) para un mejor panorama del nivel de riesgo al que se exponen los choferes en toda la operación.

Los resultados mostraron también que la capacidad del *hub* debe ser como mínimo de 4 bombonas. De ser menos, no se cumple con el requerimiento de mina. Además, en mina solo debe haber una unidad, y una vez iniciada la descarga se debe solicitar al *hub* la siguiente. No se necesita ninguna unidad más, la cantidad de unidades descargadas será cubierta incluso los días que se descarguen 2 o hasta 3 unidades, pues el tiempo de respuesta del *hub* a mina son solamente 4 horas.

RECOMENDACIONES

Luego de analizar los resultados de la comparación de escenarios se recomienda implementar el *hub* logístico con las siguientes condiciones:

- Políticas a seguir en cuanto al requerimiento
 - Tener como máximo una unidad dentro de mina. El *hub* solo enviará otra cuando la unidad en mina termine la descarga.
 - El *hub* debe solicitar a Yura una unidad cada vez que envía una a la mina, para completar su capacidad.
- Políticas a seguir dentro del *hub*
 - La empresa encargada de la gestión y operación del *hub* será FC Transportes
 - El *hub* debe cumplir todas las funciones mencionadas: programación de unidades a mina, gestión y control de requerimientos, control de unidades y supervisión de carga, revisión de documentos de las unidades, respuesta inmediata a accidentes en la ruta a mina, etc
 - Los choferes que van a la mina deben someterse cada semana a pruebas moleculares de COVID-19. No se enviará a mina un chofer que porte el virus.
- Capacidad y dimensionamiento del *hub*
 - El *hub* debe tener capacidad para almacenar por lo menos 4 unidades, y además del patio de maniobras y el espacio de estacionamiento de las unidades debe considerar ambientes internos como baño, cuarto, zona de recepción de documentos y comedor. Considerando esas indicaciones, se ha delimitado un área mínima de 704 m².
- Localización del *hub*
 - Para asegurar una respuesta en menos de 4 horas, el *hub* debe ser ubicado en la provincia de Caylloma. Se propone trabajar en un caserío a las afueras de la ciudad de Caylloma, a unos 10 Km de la plaza principal, a la altura del

desvío a Espinar (ubicación en la Figura 20), que cuenta con un área de más de 950 m², siendo más de lo necesario en caso se desee aumentar la capacidad del *hub*.

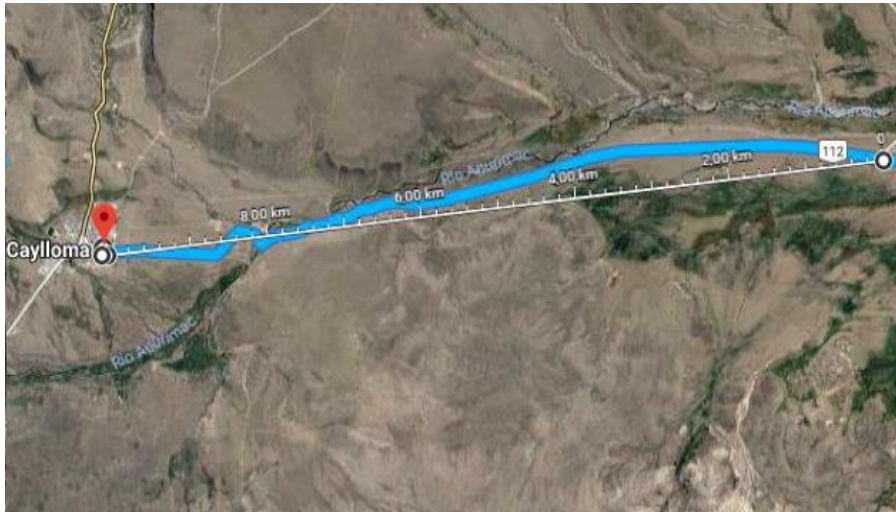


Figura 20. Ubicación satelital del caserío, posible terreno para el *hub*

- Inversión
 - Para la inversión en el proyecto, se recomienda considerar los costos de movimiento de tierras, infraestructura, metros cuadrados utilizados, arrendamiento del espacio a la comunidad de Caylloma, mano de obra utilizada, contingencias y equipos necesarios dentro de las instalaciones.

Además, se sugiere:

- Trabajar con otros suministros y otras minas:

Aprovechar la funcionalidad del *hub* y aplicar este modelo de operación a otros *commodities*. Así, el *hub* podría trabajar con otros suministros además del cemento, como peróxido, cal, petróleo, cianuro, etc. De igual manera, se puede aprovechar la funcionalidad del *hub* y abastecer no solo a Tambomayo sino a otras minas cercanas, como Orcopampa.

Naturalmente, al trabajar con otros insumos y otras minas se necesitará más unidades en la operación, tanto en tránsito al *hub*, a las minas o almacenadas en el *hub*. Por eso, se debe realizar un nuevo dimensionamiento para el *hub* y calcular la capacidad mínima necesaria para trabajar con las cadenas de suministro que se desee. Así, el *hub* debería tener la capacidad de trabajar con diferentes cadenas de suministro, cada una con diferentes restricciones y demandas independientes.

– Trabajar con el concentrado

Así como el *hub* puede ser utilizado para otros insumos, también puede ser utilizado en el proceso inverso, almacenando los camiones de concentrado que salen de mina. Estos podrían llegar al *hub* y pernoctar ahí, para salir el día siguiente al puerto de Matarani o al del Callao.

– Integración del *hub* con la comunidad

En la operación del *hub* se necesitará gente para cumplir servicios de limpieza, orden, seguridad, etc. Se recomienda contratar a personas de Caylloma y alrededores para cumplir esas labores. Al brindar empleo a la comunidad, el *hub* tendrá mayor aceptación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T.Y. Semiglia, "Necesidad de reformar la ley de minería referente a la vulneración de los derechos colectivos y a destrucción de la naturaleza," Tesis de Titulación, Fac. de Derecho, Univ. Nacional de Loja., Loja, Ecuador, 2015. [Online]. Available: <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/8187>
- [2] N.N. "Instituto de Ingenieros de Minas del Perú-Resultados". iimp.org.pe. <https://iimp.org.pe/mineria-en-el-peru/resultados> (Accessed September 1st, 2019)
- [3] V. Vargas *Actividad minera en el Perú. Definiciones*. Artículo del MINEM (Ministerio de energía y minas), 2014. [Online]. Available: <http://www.ramosdavila.pe/media/Leer-documento-del-MINEM.pdf>
- [4] N.N. *Operación minera Tambomayo*. Buenaventura.com. <https://www.buenaventura.com/es/operaciones/detalle/1> (Accessed September 1st, 2019)
- [5] *Glosario técnico minero*. República de Colombia, Ministerio de Minas y Energía.(Agosto, 2003). [Online]. Available: <https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/glosariominero.pdf>
- [6] D. Lovero. *Historia, procesos, producción y redes metalúrgicas*. Artículo de interés, Facultad de Ingeniería Geológica, Minas, Metalúrgica y Geográfica. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. [Online]. Available: <https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/consejo/boletin55/a03.pdf>
- [7] R. Benavides. "Panorama del sector minero" en *La minería responsable y sus aportes al desarrollo del Perú*. Lima: Comunica2, 2 Ed, 2017.
- [8] MINEM. "Perú en el ranking mundial de producción minera" .Lima, Perú, 2017.

- [9] Sociedad Peruana de Derecho Ambiental (SPDA). “ESTRATIFICACIÓN DE LA MINERÍA EN EL PAÍS” in *La realidad de la minería ilegal en países amazónicos*. Lima: Negrapata SAC, 2014. [Online]. Available: <https://saqueada.amazoniasocioambiental.org/La-realidad-de-la-mineria-ilegal-en-paises-amazonicos-SPDA-d891b11c9433fe22ae037fca2a0d7cd5.pdf>
- [10] D. Hoyos, V. Aguinaga, F. Valdivia, D. Ramírez & C. Abanto. “Catastro minero”. *Anuario Minero 2018, Ministerio de Energía y Minas*. Pp. 17. [Online]. Available: [https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/PUBLICACIONES/ANUAARIOS/2018/AM2018\(VF\).pdf](https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/PUBLICACIONES/ANUAARIOS/2018/AM2018(VF).pdf)
- [11] V. Torres. “Producción Ilegal: Una estimación” in *Minería Ilegal e Informal en el Perú: Impacto Socioeconómico*. 2015. CooperAcción N°2, pp. 34 [Online] Available: http://cooperaccion.org.pe/wp-content/uploads/2015/10/Libro_Mineria_Ilegal,%20Victor%20Torres%20Cuzcano.pdf
- [12] H. J. Luna. “Minería subterránea y superficial y beneficio de minerales en el Perú”. Artículo de interés, MINEM. (Marzo, 2011). [Online]. Available: <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/PUBLICACIONES/PRESENTACIONES/2011/EXPOMINA%20ECUADOR/MINERIA%20SUBTERRANEA%20Y%20SUPERFICIAL%20EN%20EL%20PERU.pdf>
- [13] N.N. Tambomayo, Hidrología, hidrogeología y calidad de agua de la UM Tambomayo (Arequipa). Wes.com. <https://wes.com.pe/project/hidrologia-hidrogeologia-y-calidad-de-agua-de-la-um-tambomayo-arequipa-2/> (Accessed October 1st, 2019)
- [14] O. Peña. “Minas subterráneas en el Perú”. Artículo informativo peruano. (2013).
- [15] J. Del Águila. ”Concesión minera: ¿Derecho de naturaleza real o habilitación de actividad minera?” .Artículo de investigación, CEDEMIN. Fac. de Derecho, Univ. San Martín de Porres., Lima, Perú. [Online]. Available:

https://derecho.usmp.edu.pe/cedemin/revista/explorando_veta/concesion_minera.pdf

- [16] M. Canfield. “Etapas del proceso productivo de una mina”. Mining course, Grupo antofagasta minerals, SONAMI. (7 de junio del 2012). [Online]. Available: <https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2016/04/01.-Etapas-del-Proceso-Productivo-de-una-Mina.pdf>.
- [17] N.N, CCM Consejo de competencias mineras. Proceso de extracción de una mina subterránea. ccm.cl. <https://www.ccm.cl/proceso-extraccion-mina-subterranea/> (Accessed October 1st, 2019)
- [18] C. Briones. “Impacto de accidentes y enfermedades laborales en la empresa minera”. 2014. Tesis de Titulación, Fac. de Ingeniería, Univ. Nacional Autónoma, México DF, México, 2014. [Online]. Available: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/4952/Tesis.pdf?sequence=1>
- [19] R. Vásquez. “La teoría de la causalidad de Bird” <https://prevencionar.com/https://prevencionar.com/2017/03/27/la-teoria-la-causalidad-frank-bird/>. (Accessed October 1st 2019)
- [20] N.N, MINEM. “Minem propondrá cambios normativos para la prevención de riesgos en el sector minero”. MINEM. (18 de junio del 2019). [Online]. Available: <http://www.minem.gob.pe/detallenoticia.php?idSector=22&idTitular=9160>
- [21] Presidencia de la república-Osinergmin, DECRETO SUPREMO N° 024-2016-EM. (29 de agosto del 2017). *Reglamento de seguridad y salud ocupacional en minería*. [Online]. Available: https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/PlantillaMarcoLegalBusqueda/DS-024-2016-EM.pdf
- [22] B. Salazar. “Análisis del modo y efecto de fallas (AMEF)” [ingenieriaindustrialonline.com](https://www.ingenieriaindustrialonline.com/). <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/lean->

- [manufacturing/analisis-del-modo-y-efecto-de-fallas-amef/](#). (Accessed October 1st, 2019).
- [23] Empresa Tradelog, “¿Qué es un hub logístico? y ¿Cómo funciona?”. tradelog.com. <http://www.tradelog.com.ar/blog/hub-logistico/> (Accessed October 1st, 2019).
- [24] EAE Business School. ¿Cómo es un hub logístico eficiente y qué tener en cuenta en su diseño?. retos-operaciones-logistica.eae.es/. <https://retos-operaciones-logistica.eae.es/como-es-un-hub-logistico-eficien>. (Accessed October 1st, 2019).
- [25] S. Huber, D. Luft, J. Klaunenberg & C. Thaller. “Integration of transport logistics hubs in freight transport demand modelling”. European transport conference, Inc. (2014). [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/31012806.pdf>
- [26] J. Yee. “A Summary and Classification of Logistics Hub Research”. Logistics research, Inc. (2013). [Online]. Available: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/102045>
- [27] M. Crillero. Factores críticos de éxito. manuel.cillero.es. <https://manuel.cillero.es/doc/metrica-3/tecnicas/factores-criticos-de-exito/> (Accessed October 1st, 2019).
- [28] J.J. Wang. “From a hub port city to a global supply chain management center: a case study of Hong Kong”. Elsevier, Inc. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2009.02.009>
- [29] A. M. Law, W David Kelton. Simulation modeling and analysis. McGraw·HiII, InC, 2nd Edition, 2015, ch 5, sec 1-5, pp 298-311 [Online] Available: <https://fac.ksu.edu.sa/sites/default/files/index.pdf>
- [30] N.N. “¿Qué es simulación?”. paragon.com. <https://www.paragon.com.br/es/academico-2/que-es-simulacion/> (Accessed Jul, 1 2019)

- [31] J.R. Sturgul. *Discrete mine system simulation in the United States. Int J Surf Min Reclam Environ.* 1999
- [32] Y. Carzon & A. Maria. *Simulation Optimization Methods and Applications. Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conferenc, Inc.* 2018. [Online] Available: <https://www.informs-sim.org/wsc97papers/0118.PDF>
- [33] A. Gutiérrez, C. Rodríguez & A. Santos. “Factores críticos de éxito para la implementación de Business Process Management (BPM): estudio de caso para la cadena de suministro de una empresa del sector floricultor”. *Revista Escuela de Administración de Negocios*, 85-108. 2018
- [34] Python. “*Python packaging user guide*”. python.org. <https://packaging.python.org/> (Accessed Mar, 1 2020)
- [35] J. Figueira, S. Greco & M. Ehrgott. *Multiple criteria decision analysis, state of the art surveys. en Springer Science + Business Media, 2005, Part I-II, pp 3-30.*
- [36] D. Peidro, J. Mula & R. Poler. *Quantitative models for supply chain planning under uncertainty: a review.* Springer, Inc, 2008.
- [37] P. Goodwin & G. Wright. *Decision analysis for management judgement.* Jhon Wiley & Sons, Ltd, 2004, ch 3,5 and 7, pp 27-70, pp 95-143 and pp 179-215
- [38] B, Efron & R. Tibshirani. *The bootstrap method for assesing statistical accuracy.* Behaviormetrika, 1985.
- [39] S. Chęciński. *Simulation analysis of traffic congestion in mineral mining transport. Process Simulation and Optimization in Sustainable Logistics and Manufacturing.* 2014.

ANEXOS

ANEXO 1: Código Python de ambos escenarios

```
"""
<> Proyecto de tesis </>

Mariana Arriz Jorquiera
Francisco Franco Conroy

2020
"""

import simpy
import numpy as np
import itertools
import random
import math
import pandas as pd
import array as arr
from numpy import random

def f_simulation_day_X_simulation_time(simulation_time):
    """
    :param simulation_time:
    :return: day corresponding to the simulation time
    """
    day = None
    if simulation_time >= 0.0:
        day = int((simulation_time + 0.00001) // 86400) + 1
    return day

def f_transfort_simulation_time_in_HH_mm(simulation_time):
    day = f_simulation_day_X_simulation_time(simulation_time=simulation_time)
    hour = 24 * ((simulation_time - ((day - 1) * 86400)) / 86400)
    mins = 60 * (hour - int(hour))
    secs = 60 * (mins - int(mins))
    hour = str(int(hour))
    if hour.__len__() == 0:
        hour = '00' + hour
    elif hour.__len__() == 1:
        hour = '0' + hour
    mins = str(int(mins))
```

```

if mins.__len__() == 0:
    mins = '00' + mins
elif mins.__len__() == 1:
    mins = '0' + mins
secs = str(round(secs))
return hour + ':' + mins + ':' + secs

def proceso1_sinhub(env):

    global contadorsh_1

    contadorsh_1 +=1

    unidad1 = "Unidad %s" % contadorsh_1

    # Mina descarga unidad
    dia = f_simulation_day_X_simulation_time(env.now)
    hora = f_transfort_simulation_time_in_HH_mm(env.now)
    print("%s descarga el dia %.0f" % (unidad1, dia), "a las ", hora)
    sh_dia_descarga.append(dia)
    sh_hora_descarga.append(hora)
    sh_arreglo_descarga.append(env.now)
    sh_unidades = unidad1
    sh_num_unidad.append(sh_unidades)
    yield env.timeout(10)
    print("%s sale de mina" % unidad1)

def unit_generator_1sinhub(env):
    for i in itertools.count():
        shtiempo_descargas = random.choice([43200, 86400, 129600, 172800, 216000,
259200, 302400, 345600],
p=[0.22, 0.36, 0.04, 0.22, 0.03, 0.08, 0.02, 0.03])

        yield env.timeout(int(shtiempo_descargas))
        print("")
        print("Viaje %d" % (i+1))
        env.process(proceso1_sinhub(env))

def proceso2_sinhub(env):

    global contadorsh_2
    global contadorsh_3

    contadorsh_3 +=1

```



```

unidad2 = "Unidad %s" % (contadorsh_3 + 5)

# Solicitud de Yura
print("Mina solicita unidad a Yura")
print("Yura envía %s a mina" % unidad2)

# Salida de Yura
dia = f_simulation_day_X_simulation_time(env.now)
hora = f_transfort_simulation_time_in_HH_mm(env.now)
print('%s sale de Yura el dia %.0f' % (unidad2, dia), "a las ", hora)
sh_dia_salida_yura.append(dia)
sh_hora_salida_yura.append(hora)

# Lead time hasta mina
yield env.timeout(86400 * 1.5)

# Llegada de unidades a mina
contadorsh_2 +=1
unidad2 = "Unidad %s" % (contadorsh_2 + 5)
dia = f_simulation_day_X_simulation_time(env.now)
hora = f_transfort_simulation_time_in_HH_mm(env.now)
sh_arreglo_llegada_mina.append(int(env.now))
sh_dia_llegada_mina.append(dia)
sh_hora_llegada_mina.append(hora)
print('%s llega a mina el dia %.0f' % (unidad2, dia), "a las ", hora)

def unit_generator_2sinhub(env):
    for i in itertools.count():
        shtiempo_pedidos = random.choice(
            [43200, 64800, 86400, 129600, 172800, 216000, 259200, 302400],
            p=[0.15, 0.085, 0.35, 0.09, 0.17, 0.1, 0.05, 0.005])

        yield env.timeout(int(shtiempo_pedidos))
        env.process(proceso2_sinhub(env))

def proceso_hub(env):
    global h_ttrayecto1
    global h_ttrayecto2
    global h_ttrayecto3
    global contadorch_1
    global contadorch_2
    global contadorch_3

    contadorch_1 += 1
    tracto3 = 'Tracto %d' % (contadorch_1 + 2)

```

```

bombona1 = 'Bombona %d' % contadorch_1
bombona2 = 'Bombona %d' % (contadorch_1 + 1)
bombona3 = 'Bombona %d' % (contadorch_1 + 5)

tractohm1 = 'Tracto %d' % 1
tractohm2 = 'Tracto %d' % 2
if contadorch_1 % 2 == 0:
    tracto1 = tractohm2
    tracto2 = tractohm1
else:
    tracto1 = tractohm1
    tracto2 = tractohm2

# Descargan unidades
dia = f_simulation_day_X_simulation_time(env.now)
hora = f_transfort_simulation_time_in_HH_mm(env.now)
tractohm = tracto1
bombona = bombona1
print('%s descarga %s el dia %.0f' % (tractohm, bombona, dia), "a las ", hora)
ch_dia_descarga.append(dia)
ch_hora_descarga.append(hora)
h_arreglo_descarga.append(env.now)
h_unidades = ('%s' % bombona)
h_num_unidad.append(h_unidades)

# Mina solicita a hub
print("Mina solicita bombona a hub")

# Hub envía a mina
dia = f_simulation_day_X_simulation_time(env.now)
hora = f_transfort_simulation_time_in_HH_mm(env.now)
tractohm = tracto2 # tracto 2
bombona = bombona2 # bombona 2
h_ttrayecto2.append(tractohm)
h_arrayviajes.append('Viaje %d' % (contadorch_1 + 1))
print('Hub envía a mina %s con %s el dia %.0f' % (tractohm, bombona, dia), "a las ",
hora)
ch_dia_salida_hub_mina.append(dia)
ch_hora_salida_hub_mina.append(hora)
h_arreglo_salida_hub_mina.append(env.now)
h_arreglo_salida_hub_mina_tracto.append(env.now)

# Hub solicita de Yura
print("Hub solicita unidad a Yura")

```

```

# Yura manda unidad

dia = f_simulation_day_X_simulation_time(env.now)
hora = f_transfort_simulation_time_in_HH_mm(env.now)
bombona = bombona3
h_ttrayecto1.append(tracto3)
print('%s con %s salen de Yura el dia %.0f' % (tracto3, bombona, dia), "a las ", hora)
ch_dia_salida_yura.append(dia)
ch_hora_salida_yura.append(hora)
h_arreglo_salida_yura.append(env.now)

# Llega unidad con bombona llena a mina
yield env.timeout(14400) # LT de Hub a mina son 4 horas
contadorch_2 += 1
bombona1 = 'Bombona %d' % contadorch_2
bombona2 = 'Bombona %d' % (contadorch_2 + 1)
dia = f_simulation_day_X_simulation_time(env.now)
hora = f_transfort_simulation_time_in_HH_mm(env.now)
tractohm = tracto2
bombona = bombona2
print('%s y %s llegan a mina el dia %.0f' % (tractohm, bombona, dia), "a las ", hora)
ch_dia_llegada_mina.append(dia)
ch_hora_llegada_mina.append(hora)
h_arreglo_llegada_mina.append(env.now)

# Llega unidad con bombona vacía a hub
dia = f_simulation_day_X_simulation_time(env.now)
hora = f_transfort_simulation_time_in_HH_mm(env.now)
tractohm = tracto1
bombona = bombona1
print('%s y %s vacía llega al hub el dia %.0f' % (tractohm, bombona, dia), "a las ", hora)
ch_dia_llegada_hub_vacia.append(dia)
ch_hora_llegada_hub_vacia.append(hora)
h_arreglo_llegada_hub_vacia.append(env.now)

# Llega unidad con bombona llena al hub
yield env.timeout(158400) # LT de Yura a mina
contadorch_3 += 1
tracto3 = 'Tracto %d' % (contadorch_3 + 2)
bombona3 = 'Bombona %d' % (contadorch_3 + 5)
dia = f_simulation_day_X_simulation_time(env.now)
hora = f_transfort_simulation_time_in_HH_mm(env.now)
bombona = bombona3
h_ttrayecto3.append(tracto3)
print('%s con %s llena llega a hub el dia %.0f' % (tracto3, bombona, dia), "a las ", hora)

```

```

ch_dia_llegada_hub_llena.append(dia)
ch_hora_llegada_hub_llena.append(hora)
h_arreglo_llegada_hub_llena.append(env.now)

# Tracto se lleva bombona vacía
dia = f_simulation_day_X_simulation_time(env.now)
hora = f_transfort_simulation_time_in_HH_mm(env.now)
bombona = bombona1
print('%s retira %s vacía del hub el dia %.0f' % (tracto3, bombona, dia), "a las ", hora)
ch_dia_salida_hub_yura.append(dia)
ch_hora_salida_hub_yura.append(hora)
h_arreglo_salida_hub_yura.append(env.now)

def unit_generator_conhub(env):
    global h_arrayviajes

    for i in itertools.count():
        htiempo_descargas = random.choice([43200, 86400, 129600, 172800, 216000,
        259200, 302400, 345600],
        p=[0.22, 0.36, 0.04, 0.22, 0.03, 0.08, 0.02, 0.03])

        yield env.timeout(int(htiempo_descargas))
        print("")
        print("Viaje %d" % (i+1))
        env.process(proceso_hub(env))

if __name__ == '__main__':

    # Para correr la simulación
    num_days_simulation = 181 # Medio año
    num_segundos_dia = 24 * 60 * 60 # 86400: 24 horas * 60 minutos * 60 segundos
    sim_time = num_days_simulation * num_segundos_dia

    # SIN HUB

    contadorsh_1 = 0
    contadorsh_2 = 0
    contadorsh_3 = 0

    # Arreglos

    # DataFrame
    sh_num_unidad = []

```

```
# Simulacion
sh_dia_descarga = []
sh_hora_descarga = []
sh_arreglo_descarga = []

sh_dia_salida_yura = []
sh_hora_salida_yura = []

sh_dia_llegada_mina = []
sh_hora_llegada_mina = []
sh_arreglo_llegada_mina = []

# CON HUB

contadorch_1 = 0
contadorch_2 = 0
contadorch_3 = 0

# Arreglos

ch_dia_descarga = []
ch_hora_descarga = []
h_arreglo_descarga = []

ch_dia_salida_hub_mina = []
ch_hora_salida_hub_mina = []
h_arreglo_salida_hub_mina = []
h_arreglo_salida_hub_mina_tracto = []

ch_dia_salida_yura = []
ch_hora_salida_yura = []
h_arreglo_salida_yura = []

ch_dia_llegada_mina = []
ch_hora_llegada_mina = []
h_arreglo_llegada_mina = []

ch_dia_llegada_hub_vacia = []
ch_hora_llegada_hub_vacia = []
h_arreglo_llegada_hub_vacia = []

ch_dia_llegada_hub_llena = []
ch_hora_llegada_hub_llena = []
h_arreglo_llegada_hub_llena = []
```

```

ch_dia_salida_hub_yura = []
ch_hora_salida_hub_yura = []
h_arreglo_salida_hub_yura = []

h_arrayviajes = []
h_num_unidad = []

h_ttrayecto1 = []
h_ttrayecto2 = []
h_ttrayecto3 = []

# SIMULACIÓN

RANDOM_SEED = 43

print("Inicio de simulacion sin Hub")
print("")
random.seed(RANDOM_SEED)
env = simpy.Environment()
env.process(unit_generator_1sinhub(env))
env.process(unit_generator_2sinhub(env))
env.run(until=sim_time)
print("")
print("Fin de simulacion sin Hub")

print("")
print("Inicio de simulación con Hub")
print("")
random.seed(RANDOM_SEED)
env = simpy.Environment()
env.process(unit_generator_conhub(env))
env.run(until=sim_time)
print("")
print("Fin de simulación con Hub")

# Ajustes para exportar datos

# SIN HUB

# Num unidad
sh_num_unidad = sh_num_unidad[5:]

# Descargas
sh_dia_descarga = sh_dia_descarga[5:]

```

```

sh_hora_descarga = sh_hora_descarga[5:]
sh_arreglo_descarga = sh_arreglo_descarga[5:]

# Salida de Yura
sh_dia_salida_yura = sh_dia_salida_yura[:-8]
sh_hora_salida_yura = sh_hora_salida_yura[:-8]

# Llegada a mina
sh_dia_llegada_mina = sh_dia_llegada_mina[:-6]
sh_hora_llegada_mina = sh_hora_llegada_mina[:-6]
sh_arreglo_llegada_mina = sh_arreglo_llegada_mina[:-6]

# Horas cola
sh_horascola = list(map(int.__sub__, sh_arreglo_descarga, sh_arreglo_llegada_mina))
sh_horascola = np.divide(sh_horascola, 3600)

# Dias cola
sh_diascola = []
sh_diassb = []

for dato in sh_horascola:
    dato = math.ceil(dato / 24)
    sh_diascola.append(dato)

# Dias sb
for dato in sh_diascola:
    if dato < 3:
        diassb = 0
        sh_diassb.append(diassb)
    else:
        diassb = math.ceil(dato - 2)
        sh_diassb.append(diassb)

sh_costosb = np.multiply(sh_diassb, 500) # Costos sb
sh_riesgosas = np.multiply(sh_diascola, 448) # Riesgos sb

# CON HUB

h_num_unidad = h_num_unidad[5:-1] # Arreglo unidades

# Descargas
ch_dia_descarga = ch_dia_descarga[5:-1]
ch_hora_descarga = ch_hora_descarga[5:-1]
h_arreglo_descarga = h_arreglo_descarga[5:-1]

```

```

# Llegada al hub luego de descargas (bombona vacía)
ch_dia_llegada_hub_vacia = ch_dia_llegada_hub_vacia[5:-1]
ch_hora_llegada_hub_vacia = ch_hora_llegada_hub_vacia[5:-1]
h_arreglo_llegada_hub_vacia = h_arreglo_llegada_hub_vacia[5:]

# Salida del hub retirando bombona vacía
ch_dia_salida_hub_yura = ch_dia_salida_hub_yura[5:]
ch_hora_salida_hub_yura = ch_hora_salida_hub_yura[5:]
h_arreglo_salida_hub_yura = h_arreglo_salida_hub_yura[5:]

# Salida del hub a mina
ch_dia_salida_hub_mina = ch_dia_salida_hub_mina[4:-2]
ch_hora_salida_hub_mina = ch_hora_salida_hub_mina[4:-2]
h_arreglo_salida_hub_mina = h_arreglo_salida_hub_mina[4:-2]
h_arreglo_salida_hub_mina_tracto = h_arreglo_salida_hub_mina_tracto[6:-1]

# Llegada a mina
ch_dia_llegada_mina = ch_dia_llegada_mina[4:-2]
ch_hora_llegada_mina = ch_hora_llegada_mina[4:-2]
h_arreglo_llegada_mina = h_arreglo_llegada_mina[4:-2]

# Salida de Yura
ch_dia_salida_yura = ch_dia_salida_yura[:-6]
ch_hora_salida_yura = ch_hora_salida_yura[:-6]
h_arreglo_salida_yura = h_arreglo_salida_yura[:-6]

# Llegada de Yura al hub
ch_dia_llegada_hub_llena = ch_dia_llegada_hub_llena[:-5]
ch_hora_llegada_hub_llena = ch_hora_llegada_hub_llena[:-5]
h_arreglo_llegada_hub_llena = h_arreglo_llegada_hub_llena[:-5]

# Tractos
h_ttrayecto1 = h_ttrayecto1[:-6]
h_ttrayecto2 = h_ttrayecto2[4:-2]
h_ttrayecto3 = h_ttrayecto3[5:]

# Viajes
h_arrayviajes = h_arrayviajes[4:-2]

# Horas en mina
h_horasCola = list(map(int.__sub__, h_arreglo_descarga, h_arreglo_llegada_mina))
h_horasCola = np.divide(h_horasCola, 3600)

h_diasCola = []

```



```

h_dias_sb = []

for dato in h_horasCola:
    dato = math.ceil(dato / 24)
    h_diasCola.append(dato)

for dato in h_diasCola:
    if dato < 3:
        diassb = 0
        h_dias_sb.append(diassb)
    else:
        diassb = math.ceil(dato - 2)
        h_dias_sb.append(diassb)

h_costos_sb_mina = np.multiply(h_dias_sb, 500)
h_riesgos = np.multiply(h_diasCola, 448)

# Horas bombona llena en hub

h_horasColaBombonaHubLlena = list(map(int.__sub__, h_arreglo_salida_hub_mina,
h_arreglo_llegada_hub_llena))
h_horasColaBombonaHubLlena = np.divide(h_horasColaBombonaHubLlena,
3600)

hch = []
h_diasColaBombonaHubLlena = []
h_dias_sb_bombona_hub_llena = []

for dato in h_horasColaBombonaHubLlena:
    hch.append(dato)

for dato in hch:
    dato = math.ceil(dato / 24)
    h_diasColaBombonaHubLlena.append(dato)

# Horas bombona vacía en hub

h_horasColaBombonaHubVacía = list(map(int.__sub__, h_arreglo_salida_hub_yura,
h_arreglo_llegada_hub_vacia))
h_horasColaBombonaHubVacía = np.divide(h_horasColaBombonaHubVacía,
3600)

hbvacía_hub = []
h_diasColaBombonaHubVacía = []
h_dias_sb_bombona_hub_vacia = []

```

```

for dato in h_horasColaBombonaHubVacía:
    hbvacía_hub.append(dato)

for dato in hbvacía_hub:
    dato = math.ceil(dato / 24)
    h_díasColaBombonaHubVacía.append(dato)

# Horas tracto en hub

h_horasColaTractoHub = list(map(int.__sub__, h_arregloSalidaHubMinaTracto,
h_arregloLlegadaHubVacía))
h_horasColaTractoHub.append(0)
h_horasColaTractoHub = np.divide(h_horasColaTractoHub, 3600)

ht_hub = []
h_díasColaTractoHub = []
h_díasSBTractoHub = []

for dato in h_horasColaTractoHub:
    ht_hub.append(dato)

for dato in ht_hub:
    dato = math.ceil(dato / 24)
    h_díasColaTractoHub.append(dato)

for dato in h_díasColaTractoHub:
    if dato < 4:
        diassb = 0
        h_díasSBTractoHub.append(diassb)
    else:
        diassb = math.ceil(dato - 2)
        h_díasSBTractoHub.append(diassb)

h_costosSBTractoHub = np.multiply(h_díasSBTractoHub, 500)

# Exportando datos

# SIN HUB

df_SH = pd.DataFrame(
    {"Unidad": sh_num_unidad, "Día salida Yura": sh_día_salida_yura, "Hora salida
Yura": sh_hora_salida_yura,
    "Día llegada a mina": sh_día_llegada_mina, "Hora llegada mina":
sh_hora_llegada_mina,

```

```

    "Horas en cola": sh_horascola, "Dia descarga": sh_dia_descarga, "Hora descarga":
sh_hora_descarga,
    "Dias de stand by": sh_diassb, "Costo de stand by": sh_costosb, "Riesgos asociados":
sh_riesgosas})

```

```

df_SH.to_csv("Datos_por_unidad_sinhub.csv", index=False)

```

```

# CON HUB

```

```

df_CH1 = pd.DataFrame(
    {"Bombona ": h_num_unidad, "Tracto Yura al hub": h_ttrayecto1, "Dia salida Yura":
ch_dia_salida_yura,
    "Hora salida Yura": ch_hora_salida_yura,
    "Dia llegada hub llena": ch_dia_llegada_hub_llena, "Hora llegada hub llena":
ch_hora_llegada_hub_llena,
    "Horas bombona en hub llena": hch,
    "Dias bombona en hub llena": h_diasCola_bombona_hub_llena,
    "Tracto hub a mina": h_ttrayecto2, "Dia salida hub a mina": ch_dia_salida_hub_mina,
    "Hora salida Hub a mina": ch_hora_salida_hub_mina,
    "Dia llegada mina": ch_dia_llegada_mina, "Hora llegada mina":
ch_hora_llegada_mina,
    "Horas cola en mina": h_horasCola, "Dias en mina": h_diasCola, "Dias de stand by
en mina": h_dias_sb,
    "Costo de stand by en mina": h_costos_sb_mina, "Riesgos asociados": h_riesgos,
    "Dia descarga": ch_dia_descarga,
    "Hora descarga": ch_hora_descarga, "Dia llegada hub vacia":
ch_dia_llegada_hub_vacia,
    "Hora llegada hub vacia": ch_hora_llegada_hub_vacia, "Horas bombona en hub
vacía": hbvacia_hub,
    "Dias bombona en hub vacía": h_diasCola_bombona_hub_vacia, "Tracto salida
hub": h_ttrayecto3,
    "Dia salida hub Yura": ch_dia_salida_hub_yura, "Hora salida hub Yura":
ch_hora_salida_hub_yura})
df_CH1.to_csv("Datos_por_bombona_conhub_1.csv", index=False)

```

```

df_CH2 = pd.DataFrame({"Viaje": h_arrayviajes, "Tracto": h_ttrayecto2, "Dia salida de
hub": ch_dia_salida_hub_mina,
    "Hora salida de Hub": ch_hora_salida_hub_mina, "Dia llegada a hub":
ch_dia_llegada_hub_vacia,
    "Hora llegada a hub": ch_hora_llegada_hub_vacia,
    "Horas en cola": h_horasCola_bombona_hub_vacia, "Dias en hub":
h_diasCola_tracto_hub,
    "Dias de sb": h_dias_sb_tracto_hub, "Costos de sb":
h_costos_sb_tracto_hub})

```

```
df_CH2.to_csv("Datos_por_bombona_conhub_2.csv", index=False)
```

ANEXO 2: Matriz AMEF para riesgos en mina

Proceso de espera y descarga en el cilo de 70 Tn	Actividad	Falla potencial	Efecto potencial de falla	S	Causas potenciales de falla	O	Control actual del proceso	D	NPR
	Ingreso a mina	Choques	Incidente en la unidad y otras máquinas o equipos dentro de mina	8	Suelo enlodado o congelado, y desorganización en la cola	5	Vigilantes y supervisores encargados de la cola	7	280
	Traslado a zona de descarga	Volcadura	Accidentalidad de las personas cerca de la unidad	10	Traslado inescrupuloso del chofer	1	Controles sobre las unidades dentro de mina	3	30
	Espera en la cola para descargar	Enfermedad	Contagio a otros operarios dentro de mina	6	El clima en Tambomayo, los cambios de temperatura constantes	6	Por el Covid surgen procesos de revisión	5	180
	Traslado a zona de descanso y alimentación	Accidentalidad en el operario	Resbalones, caídas, torpezas por el suelo siniestrado por el clima	9	Suelo lodoso y resvaloso. Traslados a pie dentro de mina	6	El operario debe informar de estos incidentes	8	432
	Descanso y alimentación	Falta de buenas condiciones para la espera	Incomodidades en el operario que afectan su performance	8	Desorganización entre áreas dentro y fuera de mina	8	El operario y agentes de BV son los que comunican estas faltas y necesidades	7	448
	Descarga en el cilo	Lesiones en el operario	El operario no está en capacidad de manejar la unidad, debe quedarse en mina más tiempo hasta que llegue la unidad de recojo	8	Mala manipulación de los elementos y equipos de descarga. Mal uso de las herramientas, como la comba.	3	Hay procedimientos y capacitaciones para la descarga	2	48
		Olvido de EPP's	El operario puede sufrir de lesiones graves o hasta mortalidad, BV y FC se ven perjudicados	9	Distracción del operario	2	Hay procedimientos y capacitaciones para la descarga	3	54
		Intoxicación	Problemas de visión y respiración en el operario	8	Mala conexión de la manguera de descarga	2	BV tiene seguimiento de los operarios, más es personalizado	7	112
	Salida de mina	Falta de papeleo	La facturación y verificación del servicio se ve perjudicada por retrasos	8	Distracción del operario	6	Los controles de FC y BV no son a tiempo real. No hay trazabilidad.	7	336

Fallo a monitorear NPR <= 30	Fallo en alerta 30 < NPR <= 100	Fallo a atender NPR > 100
--	--	---

ANEXO 3: Matriz AMEF para riesgos en tránsito a la mina

Proceso de tránsito a la mina Tambomayo	Actividad	Falla potencial	Efecto potencial de falla	S	Causas potenciales de falla	O	Control actual del proceso	D	NPR	
	Tránsito en ruta hacia mina. Yura → Sibayo → Condorcuyo → Caylloma → Mina Tambomayo	Choques frontales	La unidad y el chofer sufren un accidente de choque	La unidad y el chofer sufren un accidente de choque	7	Curvas peligrosas y altas velocidades en el manejo	5	El centro de control nota irregularidades en la ruta y el GPS	5	245
		Derrumbes/Huaycos	La ruta está siniestrada, impidiendo el paso	La ruta está siniestrada, impidiendo el paso	7	Climatología hostil de la sierra	5	El chofer debe observar los derrumbes o huaycos para informar al CC	7	245
		Rotura del muelle	Los muelles de la bombona se rompen por la fatiga	Los muelles de la bombona se rompen por la fatiga	8	Fatiga del muelle por la constantes vibraciones y golpes	6	El chofer informa al puesto de control sobre los incidentes y accidentes	2	96
		Cierre de carreteras por mantenimiento	Las unidades no pueden continuar la ruta	Las unidades no pueden continuar la ruta	4	El mal estado de la ruta y por ende la obligación de repararlas	5	El centro de control está en constante información con las poblaciones aledañas	4	80
		Paro de comunidades	Las unidades no pueden continuar la ruta	Las unidades no pueden continuar la ruta	9	Las poblaciones aledañas reclaman al estado y la empresa	4	El chofer informa al puesto de control sobre los incidentes y accidentes	2	72
		Volcadura	El tracto o la bombona se vuelcan en la ruta a mina	El tracto o la bombona se vuelcan en la ruta a mina	10	Distracción del chofer o zonas no bien señaladas	2	El chofer informa al puesto de control sobre los incidentes y accidentes	3	60
		Caída al precipicio	La unidad sufre un accidente de caída al barranco	La unidad sufre un accidente de caída al barranco	10	Sueño del chofer o falta de visibilidad de la ruta	2	El centro de control nota irregularidades en la ruta y el GPS	3	60
		Revienta una llanta	Una o más llantas de la unidad se revientan por el uso y complicaciones de ruta	Una o más llantas de la unidad se revientan por el uso y complicaciones de ruta	6	Estado no adecuado de la ruta, precipitaciones, huecos, etc	9	El chofer informa al puesto de control sobre los incidentes y accidentes	1	54
		Malestar, fatiga, sueño del chofer	Incomodidad del chofer al realizar su trabajo	Incomodidad del chofer al realizar su trabajo	8	Falta de descanso del chofer, mala noche	3	El chofer informa al puesto de control sobre su situación	2	48
Falta de gasolina		La unidad se queda sin combustible	La unidad se queda sin combustible	6	El chofer no cargó la cantidad adecuada de combustible	1	El chofer informa al puesto de control sobre los incidentes y accidentes	1	6	
Espera en Condorcuyo	Robo	La unidad, sus partes o el suministro son robados	10	Descuido del chofer y pernócte al aire libre de las unidades	2	El chofer informa al puesto de control sobre los incidentes y accidentes	4	80		

Fallo a monitorear NPR <= 30	Fallo en alerta 30 < NPR <= 100	Fallo a atender NPR > 100
--	---	-------------------------------------