

**MODELO DE PROGRAMACIÓN DE OPERACIONES EN UNA MINA A CIELO
ABIERTO: APLICACIÓN EN ORGANIZACIÓN CORONA**

JULIÁN ROLANDO WIEST GOYENECHÉ

**Universidad de La Sabana
Escuela Internacional de Ciencias Económicas y Administrativas
Chía, Colombia
2019**

**MODELO DE PROGRAMACIÓN DE OPERACIONES EN UNA MINA A CIELO
ABIERTO: APLICACIÓN EN ORGANIZACIÓN CORONA**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para obtener el título de

MAGÍSTER EN GERENCIA DE OPERACIONES

(Modalidad profundización)

JULIÁN ROLANDO WIEST GOYENECHÉ

Directora:

ELYN LIZETH SOLANO CHARRIS, Ph.D.

Universidad de La Sabana
Escuela Internacional de Ciencias Económicas y Administrativas
Chía, Colombia
2019

DEDICATORIA

A Dios, por ser el inspirador y darme la fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados, a pesar de las circunstancias y dificultades.

A mis padres, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy.

A todas las personas que me apoyaron para que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que me abrieron sus puertas y compartieron sus conocimientos.

AGRADECIMIENTOS

Mis sinceros agradecimientos a:

La empresa Sumicol, de la Organización Corona, por becarme, permitir realizar esta maestría, y brindarme todo el apoyo necesario.

La directora de tesis, doctora Elyn Solano Charris, por su conocimiento, profesionalismo, y consejos los cuales fueron indispensables para terminar a cabalidad este proyecto de grado.

Los profesores de la maestría, por todo el conocimiento impartido en las distintas asignaturas cursadas.

Ingeniero Óscar Ocampo Pérez, mi jefe, por su permanente apoyo y sus consejos, por permitirme los espacios necesarios para cumplir los objetivos académicos durante toda la maestría.

Grupo de trabajo de la zona minera de Bogotá de Sumicol, por permitirme realizar el trabajo de grado, y aportarme todo su conocimiento y experiencia.

JULIAN ROLANDO WIEST GOYENECHÉ

Resumen:

Las empresas desarrollan estrategias que requieren un gran esfuerzo, para la optimización de recursos, por este motivo la programación de operaciones se convierte en un foco de mejora, como es el caso en la Organización Corona. Este proyecto busca proponer un modelo para la programación de operaciones mineras a cielo abierto, con el fin de mejorar la eficiencia de la utilización de los equipos de minería, enfocándose en la reducción de costos de utilización de equipos, en la división de insumos industriales de la organización Corona. Para esto, se plantea realizar un diagnóstico que permita generar oportunidades de mejora. Después, se busca analizar diferentes escenarios por medio del planteamiento de modelos matemáticos. Por último, se valida el comportamiento del modelo propuesto.

Palabras clave: programación de operaciones, multitarea, mina, cielo abierto, equipos de minería

Abstract :

The companies develop strategies that require a great effort for resource optimization, thus, scheduling becomes a focus of improvement, which it is also the case of Corona organization. This project seeks to propose a model for operations scheduling in an open-pit mine to improve the efficiency of mining equipment and reduce the equipment utilization costs in the department of Industrial Supply of Corona organization. Then, a diagnosis is proposed to generate opportunities for improvement. Next, we seek to analyze different scenarios through mathematical models. Finally, the behavior of the proposed models is validated.

Keywords: scheduling, multiskill, mine, open-pit, productivity , mining equipment

Contenido

1.	Introducción	11
1.1.	Planteamiento del problema	11
1.1.1.	Contexto	11
1.1.2.	Problema de investigación.....	17
1.1.3.	Pregunta de investigación.....	20
1.1.4.	Objetivo general	20
1.1.5.	Objetivos específicos.....	20
1.1.6.	Justificación y delimitación.....	21
1.2.	Metodología de investigación	23
1.2.1.	Tipo de estudio	23
1.2.2.	Fuentes y técnicas.....	23
1.2.3.	Método de investigación	23
2.	Revisión de la literatura.....	25
2.1.	Recolección de material	25
2.2.	Análisis descriptivo	25
2.3.	Selección de categoría.....	25
2.4.	Resultados de revisión.....	26
2.5.	Multi-Skilled Resource-Constrained Project Scheduling.....	26
2.5.1.	Métodos de solución del MSRCP	28
2.5.2.	Medidas de rendimiento del MSRCP	30
2.5.3.	Características del MSRCP	32
2.6.	Conclusiones del capítulo.....	34
3.	Diagnóstico del sistema de operaciones mineras	36
3.1.	Sistema de gestión de operaciones	37
3.2.	Descripción del método de diagnóstico.....	40
3.3.	Definición de indicadores clave	40
3.4.	Medición de indicadores clave.....	43
3.4.1.	Análisis de costo de venta	43
3.4.2.	Kanban Clientes	46
3.4.3.	Reclamos	47
3.4.4.	Eficiencia global de equipos (EGE)	48

3.5.	Resultados del diagnóstico	50
3.6.	Conclusiones del capítulo.....	52
4.	Métodos de solución propuestos	53
4.1.	Modelo monoproducción sin asignación de operadores	53
4.2.	Modelo monoproducción con asignación de operadores	55
4.3.	Modelo multiproducción sin asignación de operadores	58
4.4.	Modelo multiproducción con asignación de operadores.....	60
5.	Diseño experimental y resultados.....	63
5.1.	Descripción del diseño experimental	63
5.2.	Instancias y pruebas	64
5.3.	Análisis de Resultados	64
5.3.1.	Escenario monoproducción.....	64
5.3.2.	Escenario multiproducción.....	67
5.3.3.	Ahorros obtenidos	68
5.3.4.	Tiempos computacionales	69
5.4.	Conclusiones del capítulo.....	70
6.	Conclusiones	71
	Referencias.....	72
	Anexos.....	76

Lista de Figuras

Figura 1. Modelo de negocios de la Organización Corona	11
Figura 2. Estructura de la División de Insumos Industriales.....	12
Figura 3. Esquema de operaciones, subdivisión de minas y materias primas	12
Figura 4. Proceso de fabricación de revestimiento cerámico	13
Figura 5. Descripción del proceso de explotación minera	15
Figura 6. Proceso extractivo en la mina a cielo abierto.....	15
Figura 7. Proceso productivo de la mina a cielo abierto	16
Figura 8. Distribución global del tiempo.....	17
Figura 9. Horas de uso de EMS durante 2018.....	21
Figura 10. Horas y costo de utilización de equipos alquilados durante el 2018.....	22
Figura 11. Costo unitario de venta durante el año 2018.....	22
Figura 12. Distribución de publicaciones en el tiempo	26
Figura 13. Contextos de aplicación del MSRCSP.....	28
Figura 14. Métodos de solución del MSRCSP.....	29
Figura 15. Medidas de rendimiento del MSRCSP	31
Figura 16. Restricciones del MSRCSP.....	33
Figura 17. Estructura del modelo Kaizen.....	39
Figura 18. Pilares de la metodología TPM en Organización Corona.....	39
Figura 19. Proceso del método de diagnóstico.....	40
Figura 20. Estructura de indicadores del pilar de mejoras enfocadas del TPM	41
Figura 21. Elementos del diagnóstico..	42
Figura 22. Ventas y costo de venta comparativo.....	44
Figura 23. Ejecución del presupuesto durante el 2018.....	44
Figura 24. Productividad de la mina objeto de estudio	45
Figura 25. Cumplimiento de entregas	46
Figura 26. Indicador Kanban clientes mina.....	46
Figura 27. Nivel de inventario de producto mina.....	47
Figura 28. Producto no conforme mina.....	48
Figura 29. Comportamiento del EGE en la mina objeto de estudio.....	48
Figura 30. Disponibilidad de equipos en la mina objeto de estudio.....	49
Figura 31. Rendimiento de equipos de la mina objeto de estudio.....	49
Figura 32. Calidad a la primera de la mina objeto de estudio	50
Figura 33. Porcentaje de éxitos	51
Figura 34. Porcentaje de fracasos.....	52
Figura 35. Prueba Kruskal Wallis para escenarios monoproducción.....	65
Figura 36. Diagrama de cajas y bigotes de función objetivo y tipo de producto para escenarios monoproducción	65
Figura 37. Diagrama de cajas y bigotes de función y tamaño de lote objetivo para escenarios monoproducción	66
Figura 38. Diagrama de cajas y bigotes de tiempo computacional y método para escenarios monoproducción	66
Figura 39. Prueba Kruskal Wallis para escenarios multiproducción	67

Figura 40. Diagrama de cajas y bigotes de función objetivo y tipo de producto para escenarios multiproducto	68
Figura 41. Diagramas de cajas y bigotes de función y tamaño de lotes de cada producto objetivo para escenarios multiproducto.....	68
Figura 42. Diagrama de cajas y bigotes de tiempo computacional y método para escenarios multiproducto	68

Lista de Tablas

Tabla 1. Productos de la mina en estudio	14
Tabla 2. Proceso y actividades en la mina a cielo abierto	14
Tabla 3. Equipos móviles de superficie utilizados en la mina	16
Tabla 4. Matriz relación equipo-habilidad.	18
Tabla 5. Matriz relación habilidad-actividad	19
Tabla 6. Rendimiento de EMS para realizar ejecutar habilidades.....	19
Tabla 7. Factor de rendimiento de habilidades en cada actividad.....	20
Tabla 8. Revistas científicas de la revisión de literatura	27
Tabla 9. Contextos de aplicación del MSRCP	27
Tabla 10. Métodos de solución del MSRCP	28
Tabla 11. Medidas de rendimiento del MSRCP.....	30
Tabla 12. Restricciones del MSRCP	32
Tabla 13. Metodologías de excelencia operacional.....	37
Tabla 14. Descripción de indicadores.	42
Tabla 15. Resultados del Diagnóstico.	50
Tabla 16. Diseño experimental.....	63
Tabla 17. Ahorros obtenidos por instancia en los distintos escenarios	69
Tabla 18. Diferencia en tiempos computacionales en los distintos escenarios	69

1. Introducción

1.1. Planteamiento del problema

1.1.1. Contexto

En el entorno competitivo actual, la programación de operaciones desempeña un papel crucial en las industrias manufactureras y de servicio, para identificar oportunidades de mejora en el uso eficiente de los recursos, y así generar beneficios como el incremento de utilidades o reducción de costos. Por esta razón, organizaciones como Corona, realizan múltiples esfuerzos por lograr un equilibrio entre la efectividad de sus operaciones y la sostenibilidad del negocio.

Según información de la empresa, Corona Industrial, en adelante Corona, es una multinacional colombiana, con más de 135 años de historia empresarial dedicada a la producción y comercialización de productos para el hogar, la construcción, la industria, la agricultura y el sector de energía. Corona está compuesta por cuatro Divisiones de Negocios – Baños y Cocinas; Superficies, Materiales y Pinturas; Insumos Industriales y Manejo de Energía; y Mesa Servida – y dos Unidades Comerciales que son Almacenes Corona y Comercial Corona Colombia. La empresa cuenta con 20 plantas de manufactura en Colombia, 3 en Estados Unidos, 3 en Centroamérica y 3 en México, así como con una oficina de suministros globales en China. Corona genera más de 9000 empleos y exporta sus productos a diversos mercados alrededor del mundo, incluyendo Estados Unidos, Canadá, México, Brasil, Chile, Venezuela, Centro América, el Caribe, Italia, España y el Reino Unido. La Figura 1 muestra las divisiones de negocios.



Figura 1. Modelo de negocios de la Organización Corona. Fuente: Organización Corona.

El sistema de operaciones de la organización se concentra en la extracción de minerales no metálicos, la manufactura de materiales para la construcción y posterior comercialización de productos. El presente proyecto se desarrollará en el área de minas y materias primas de la división de insumos industriales, la cual es el área encargada de gestionar los recursos del proceso de explotación y es responsable de proveer materias primas para las plantas de revestimientos cerámicos de la división de superficies, materiales y pinturas.

En la Figura 2 se muestra la estructura de la división de insumos industriales y energía. Mientras que el esquema de operaciones de la subdivisión de minas se presenta en la Figura 3; en rojo se resalta la cadena de valor de arcillolitas* de cocción roja, la cual se extrae de las minas a cielo abierto.

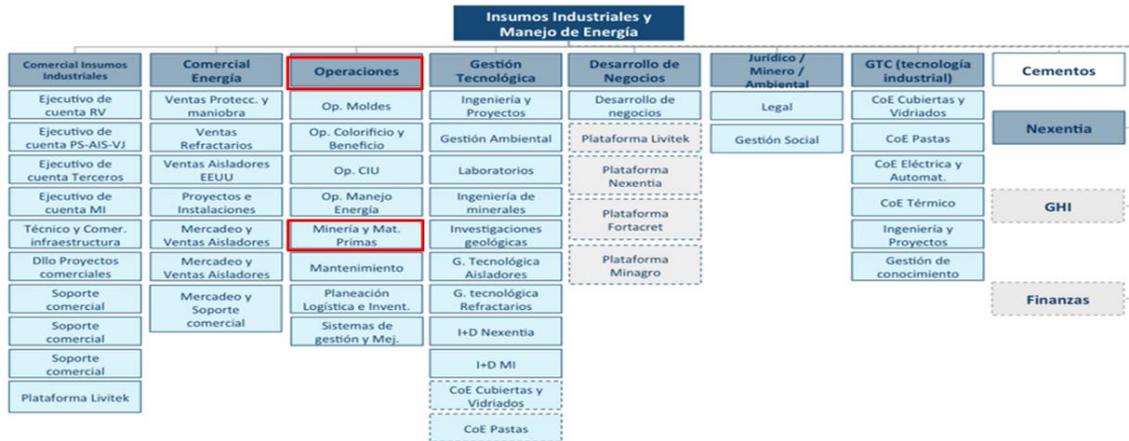


Figura 2. Estructura de la División de Insumos Industriales. Fuente: Organización Corona.

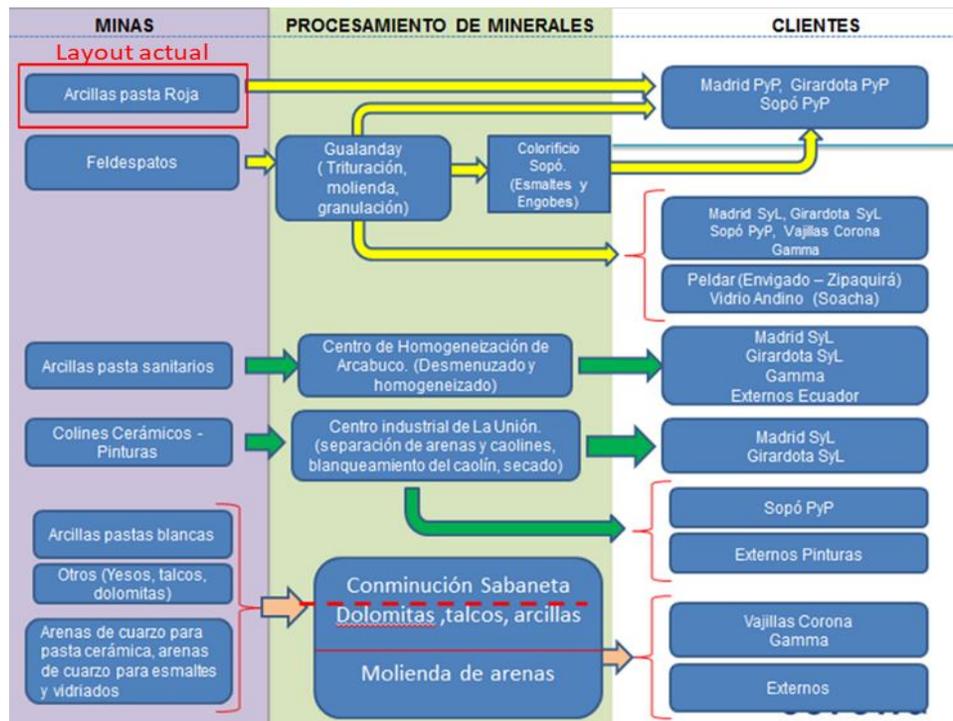


Figura 3. Esquema de operaciones, subdivisión de minas y materias primas. Fuente: Organización Corona.

El negocio de revestimientos cerámicos de la división de superficies representa cerca de un 50% de las ventas de Corona, y este a su vez se convierte en uno de los principales clientes de la división de insumos industriales, debido al volumen necesario de materia prima para fabricar, en promedio

* Arcillolitas. El Ministerio de Minas de Colombia define el término, como una roca sedimentaria de origen detrítico. Es una roca compacta, sin fisilidad que está formada por partículas del tamaño de la arcilla.

3.500.000 m² por mes. La cadena de valor de este negocio incluye un proceso productivo que requiere la extracción de materias primas (minas a cielo abierto), la preparación de pasta cerámica (plantas de molienda y atomizado), la preparación de esmaltes y fritas (plantas de Colorificio), el prensado-secado-cocción (plantas cerámicas), y por último la clasificación y empaque.

Los parámetros de los revestimientos cerámicos se estandarizan por medio de la norma internacional ISO 13006, la cual define un revestimiento cerámico como una placa de poco grosor fabricada con arcillas (extraídas de minas a cielo abierto) y otras materias primas inorgánicas que se utilizan para cubrir paredes y suelos; estos materiales, están moldeados por extrusión o prensado al ambiente y deben ser sometidos a un proceso de secado y cocido para obtener las propiedades requeridas (Norma Internacional ISO 13006, 2018).

El diagrama de flujo de la cadena de valor para la fabricación de revestimientos cerámicos en Corona, se muestra en la Figura 4. Los cuadros de borde azul, representan las actividades del proceso, cuya operación la realiza la división de insumos industriales. Los cuadros de borde rojo representan las actividades del proceso, cuya operación la realiza la división de superficies materiales y pinturas. Los cuadros sombreados en azul, delimitan el alcance del presente proyecto, el cual se define desde la extracción del material hasta el cargue y despacho en mina, debido a que son las actividades propias de la operación minera, en donde se tiene una mayor necesidad de mejorar la programación de operaciones.

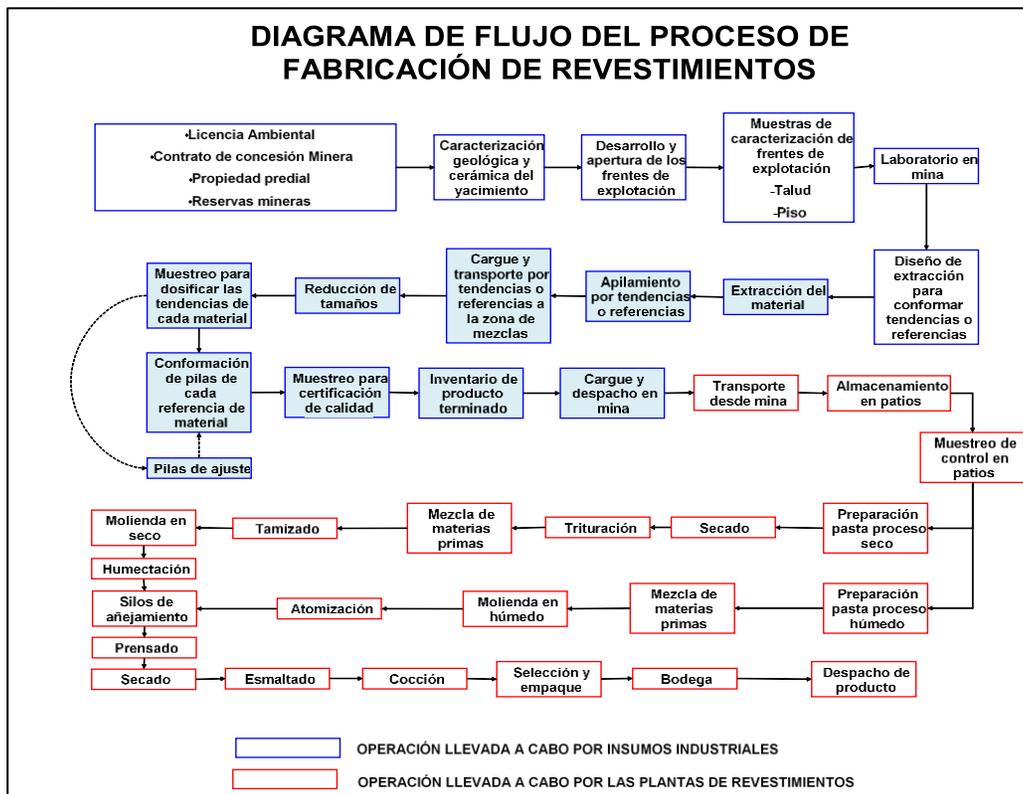


Figura 4. Proceso de fabricación de revestimiento cerámico. Fuente: Organización Corona.

El proceso de extracción y preparación de materia prima para la elaboración de revestimientos cerámicos, inicia en las minas a cielo abierto, en donde se extraen minerales del subsuelo, dentro de

zonas concesionadas y otorgadas por el estado colombiano, y que posteriormente se mezclan entre sí, para obtener un producto como los que se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Productos de la mina en estudio Fuente: Organización Corona.

Producto	Especificación de calidad	Descripción
1	Contracción % (3,3 a 3,8) Absorción de agua % (5,9 a 7,5)	Aporta una fundencia media en las pastas cerámicas para baldosas
2	Contracción % (1,9 a 2,9) Absorción de agua % (6,5 a 8,5)	Aporta una fundencia baja en las pastas cerámicas para baldosas
3	Contracción % (3,9 a 4,9) Absorción de agua % (3,6 a 5,6)	Aporta una fundencia alta en las pastas cerámicas para baldosas

El proceso en mina inicia con el desarrollo, preparación y mantenimiento de áreas a explotar, luego se realiza la explotación de materiales tipo 1, 2 y 3; posteriormente se realiza la mezcla y, por último, el despacho del producto a las plantas de fabricación. La Figura 5 muestra aspectos clave del proceso, mientras que en la Tabla 2 se muestran las actividades derivadas de cada etapa del proceso. Es importante precisar que para elaborar cada producto, se hace necesaria la programación de un proyecto específico por cada diseño de lote de consumo para los clientes, donde se incluyen las actividades de descapote, explotación y mezcla de diferentes subproductos (módulos) que se mezclan entre sí, para llegar a las especificaciones pactadas con los clientes.

Tabla 2. Proceso y actividades en la mina a cielo abierto. Fuente: Elaboración propia.

Proceso	Actividades	Abreviatura
Desarrollo, preparación y mantenimiento de la mina	Construir drenajes	DDr
	Construir lagos sedimentadores	DLg
	Limpiar lodos	DML
	Remover estéril	DRm
	Cargar estéril	DCg
	Transportar estéril	DTr
	Conformar estéril en botaderos	DCf
Explotación de materiales	Arrancar material de piso	EAr
	Apilar material arrancado	EAp
	Homogeneizar material explotado	EHg
Mezcla de materiales	Acarrear material homogeneizado	Mac
	Cargar material homogeneizado	MCg
	Transportar material homogeneizado	MTr
	Mezclar capas de material homogeneizado	MCf
	Homogeneizar material mezclado	MHg
Despacho de materiales a plantas	Limpiar material mezclado	DsLm
	Cargar material mezclado	DsCg

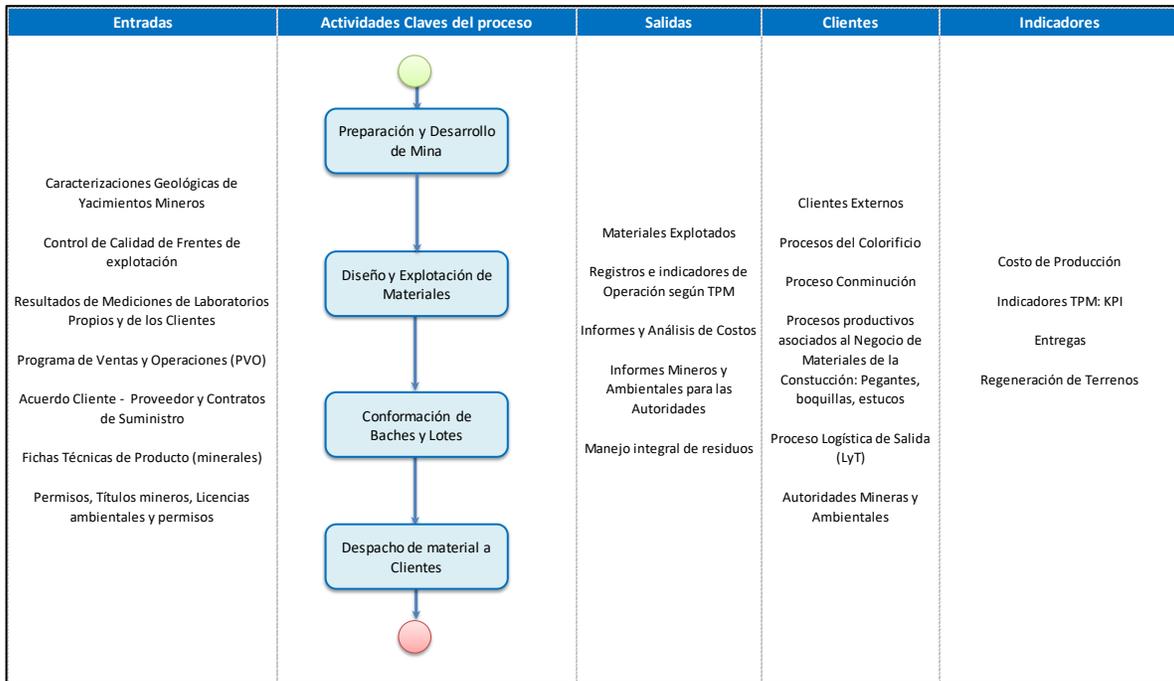


Figura 5. Descripción del proceso de explotación minera. Fuente: Organización Corona.

La Figura 6 muestra el esquema general de explotación en la mina, mientras el proceso productivo de la explotación minera se muestra en la Figura 7.

ESQUEMA DE OPERACIÓN DE LA MINA

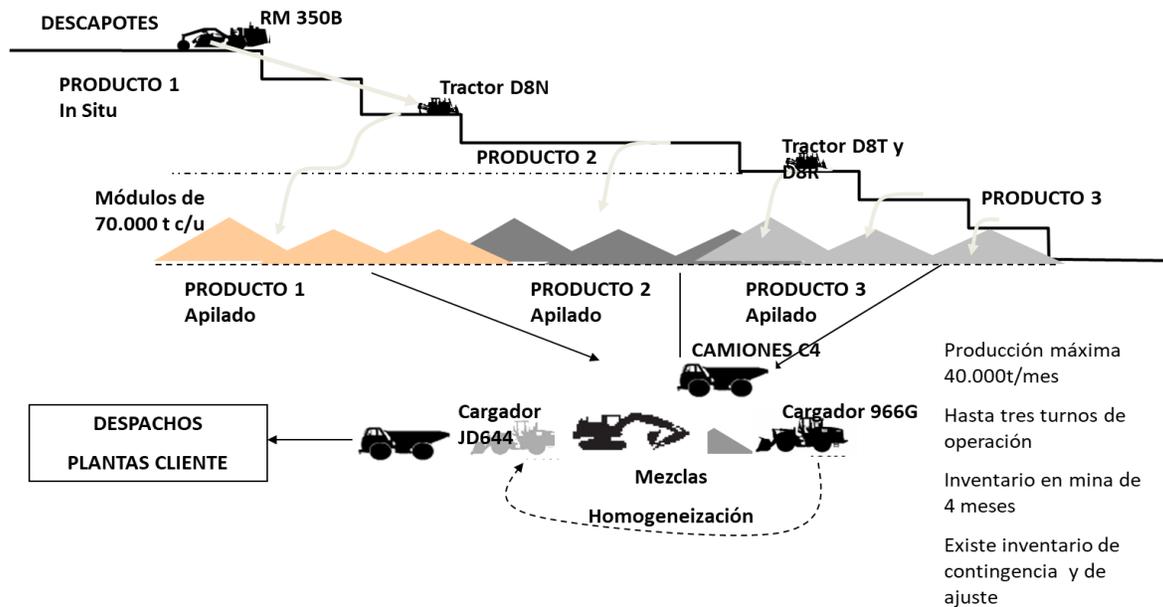


Figura 6. Proceso extractivo en la mina a cielo abierto. Fuente: Organización Corona.



Figura 7. Proceso productivo de la mina a cielo abierto. Fuente: Organización Corona.

El proceso minero a cielo abierto se realiza con Equipos Móviles de Superficie (EMS), los cuales están especializados para actividades de minería. Estos EMS tienen especial atención en el sistema de operaciones mineras, ya que su alto costo de operación incide significativamente en el costo final de los productos, representando un 60% de los costos totales de acuerdo con datos de la empresa. En la Tabla 3, se muestran los equipos disponibles para realizar las actividades relacionadas al proceso de explotación de minerales en la mina de estudio.

Tabla 3. Equipos móviles de superficie utilizados en la mina. Fuente: Organización Corona.

Tipo de Equipo	Referencia	Cantidad disponible	Cantidad disponible en alquiler
Desgarradora	CAT350	1	
Tractor de orugas	CATD8	1	
Tractor de orugas	CATD8		1
Tractor de orugas	CATD8		1
Excavadora	CAT336		1
Cargador frontal	CAT966	1	
Cargador frontal	John Deere 644K		1
Camión	C4		6

La Figura 8 muestra la distribución global del tiempo considerando factores de utilización, disponibilidad, rendimiento y calidad. Este proyecto considera la programación de los EMS dentro de la operación de explotación minera, para mejorar su costo de utilización.



Figura 8. Distribución global del tiempo. Fuente: Organización Corona.

1.1.2. Problema de investigación

De acuerdo con Alomía y Lozano (2013), existe el modelo RCPSP (*Resource Constrained Project Scheduling Problem*), el cual fue desarrollado para solucionar la programación de múltiples proyectos teniendo en cuenta la restricción de recursos. Dadas las características comunes entre los proyectos y la producción en ambientes de fabricación *Job Shop – Make To Order*, en los cuales cada trabajo tiene una ruta de fabricación fija, pero no necesariamente iguales y se realizan bajo pedido de cliente (Pinedo, 2008), este tipo de modelos pueden ser adaptados como herramienta para la programación de la producción (Egri y otros, 2004).

Por esta razón se plantea un problema tipo project scheduling, en el cual los equipos realizan diferentes tareas para extraer determinados productos en diferentes zonas. En este proceso se tiene como objetivo programar los equipos para reducir costos dentro del tiempo de operación considerando el uso de equipos, secuencia de actividades y restricciones asociadas a nivel operacional y ambiental. Dentro del contexto productivo analizado en la sección 1.1.1, la empresa requiere reducir los costos asociados al uso de los EMS, por medio de una programación de operaciones que permita establecer el momento en que inician las actividades, su duración y terminación, así como los equipos que serán asignados para ejecutarlas considerando parámetros como:

- ✓ Rendimiento de los equipos. Se refiere a la capacidad de un EMS para realizar determinada actividad.
- ✓ Fecha de lanzamiento. Se refiere a la fecha en la cual debe iniciarse la producción de un lote de producto, según la planeación de ventas y operaciones (PVO) de la división de minas.
- ✓ Fecha de entrega. Se refiere a la fecha en la cual debe terminarse la producción de un lote de producto, según las fechas pactadas con los clientes.
- ✓ Costo de procesamiento. Se refiere al costo total de fabricación de un producto de mina.

Al mismo tiempo, es importante considerar limitantes en el uso de recurso, por eso se resaltan las restricciones más relevantes en la caracterización del proceso:

- ✓ Precedencia según la secuencia de explotación de los productos 1, 2 y 3.
- ✓ Selección de la tarea o actividad a ejecutar.
- ✓ Selección y capacidad de los EMS, según la actividad que pueden realizar.
- ✓ Utilización de los EMS.
- ✓ Cumplimiento de plazos de entrega y fechas de liberación.
- ✓ Culminación de las actividades.

Considerando las características mencionadas, se establece que el problema de la empresa relacionado con la programación de operaciones de los EMS, se adapta al *Multi-Skilled Resource-Constrained Project Scheduling Problem* (MSRCPSP), o Problema de Programación de Proyectos con Restricciones de Recursos Multitarea, desarrollado por Neron y Boptista (2002). El MSRCPSP consiste en determinar un cronograma factible, respetando las restricciones de precedencia entre las actividades y las restricciones de recursos: un recurso no puede ejecutar una habilidad que no domina, no puede asignarse a más de una actividad en un momento dado y debe asignarse a la actividad correspondiente, durante todo su tiempo de procesamiento, al mismo tiempo un recurso tiene la capacidad de ejecutar actividades con diferentes habilidades. El objetivo es minimizar la duración total del proyecto (Bellenguez-Morineau, 2008).

Según información de la empresa, los EMS representan un foco de revisión importante para el logro de los objetivos de cumplimiento de productividad y costos, ya que como se mencionó previamente, representan un 60% del costo final de producción, por tanto, la organización requiere un modelo de programación de equipos. Para esto, se plantea la programación de operaciones en un ambiente MSRCPSP, donde los equipos realizan diferentes tareas para extraer determinados productos de diferentes zonas de la mina, considerando que los EMS son recursos que pueden realizar multitareas dentro de las etapas y actividades del proyecto específico. En la Tabla 4, se relaciona el equipo disponible para realizar determinada habilidad dentro del proceso productivo. Por otra parte, en la Tabla 5, se puede observar la relación entre las habilidades de los EMS en función de las actividades del proceso.

Tabla 4. Matriz relación equipo-habilidad. Fuente: Elaboración propia.

ID	EMS (i)	Tipo de EMS	+Tipo de habilidad						
			Excavar	Remover	Desgarrar	Extender	Cargar	Repalear	Transportar
1	CAT350B	Desgarradora			1				
2	CATD8N	Tractor de orugas		1		1		1	
3	CATD8T	Tractor de orugas		1		1		1	
4	CATD8R	Tractor de orugas		1		1		1	
5	CAT336	Excavadora	1	1			1	1	
6	CAT966H	Cargador frontal				1	1		1
7	John Deere 644K	Cargador frontal				1	1		1
8	Camión 1	Camión							1
9	Camión 2	Camión							1
10	Camión 3	Camión							1
11	Camión 4	Camión							1
12	Camión 5	Camión							1
13	Camión 6	Camión							1

Tabla 5. Matriz relación habilidad-actividad. Fuente: Elaboración propia.

Habilidad	Tipo de habilidad	Descripción	Desarrollo, preparación y mantenimiento de la mina							Explotación			Mezcla					Despacho	
			DDr	DLg	DML	DRm	DCg	DTr	DCF	EA r	EA p	EH g	MA c	MC g	MT r	MC f	MH g	DsL m	DsC g
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	Excavar	Movimiento de tierras realizado a cielo abierto en una profundidad no mayor a 2 m	1	1	1													1	
2	Remover	Movimiento de todas las rocas que se encuentran por encima de la rasante del plano de arranque de explotación				1													
3	Desgarrar	Acción de aflojar y desplazar el terreno							1										
4	Extender	Dar forma específica al material explotado o mezclado	1	1	1			1		1		1			1			1	
5	Cargar	Depositar material en medios de transporte	1	1	1		1						1					1	1
6	Repalear	Mover materiales apilados en el mismo sitio									1						1		
7	Transportar	Llevar material de un lugar a otro	1	1	1			1							1			1	

Como se puede apreciar, existe una necesidad primordial de programar los recursos eficientemente para reducir el costo de utilización de los EMS, para la fabricación de productos de mina, considerando la secuencia de actividades y restricciones asociadas a los EMS con múltiples habilidades. En las Tablas 6 y 7, se pueden ver los rendimientos de los EMS para realizar habilidades y el factor de rendimiento de cada habilidad en las diferentes actividades, respectivamente.

Tabla 6. Rendimiento de EMS para realizar ejecutar habilidades. Fuente: Elaboración propia.

RENDIMIENTO ESTANDAR EMS			Tipo de habilidad [Ton/h]						
ID	EMS (i)	Tipo de EMS	Excavar	Remover	Desgarrar	Extender	Cargar	Repalear	Transportar
1	CAT350B	Desgarradora			216				
2	CATD8N	Tractor de orugas		225		202.5		300	
3	CATD8T	Tractor de orugas		225		202.5		300	
4	CATD8R	Tractor de orugas		225		202.5		300	
5	CAT336	Excavadora	225	225			195	337.5	
6	CAT966H	Cargador frontal				120	190		30
7	John Deere 644K	Cargador frontal				120	180		30
8	Camión 1	Camión							60
9	Camión 2	Camión							60
10	Camión 3	Camión							60
11	Camión 4	Camión							60
12	Camión 5	Camión							60
13	Camión 6	Camión							60

Tabla 7. Factor de rendimiento de habilidades en cada actividad. Fuente: Elaboración propia.

REQUERIMIENTO ACTIVIDAD-HABILIDAD			Desarrollo, preparación y mantenimiento de la mina							Explotación			Mezcla					Despacho		
Habilidad (k)	Tipo de habilidad	Descripción	DDr	DLg	DML	DRm	DCg	DTr	DCf	EAr	EAp	EHg	MAc	MCg	MTr	MCf	MHg	DsLm	DsCg	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
1	Excavar	Movimiento de tierras realizado a cielo abierto en una profundidad no mayor a 2 m	100%	95%	90%														100%	
2	Remover	Movimiento de todas las rocas que se encuentran por encima de la rasante del plano de arranque de explotación				90%														
3	Desgarrar	Acción de aflojar y desplazar el terreno								100%										
4	Extender	Dar forma específica al material explotado o mezclado	100%	100%	90%				100%		100%		90%			90%			95%	
5	Cargar	Depositar material en medios de transporte	100%	100%	90%		100%							90%					100%	90%
6	Repalear	Mover materiales apilados en el mismo sitio										100%						90%		
7	Transportar	Llevar material de un lugar a otro	100%	100%	90%			100%									90%			95%

Debido a la complejidad en la programación de este tipo de operaciones mineras, el presente proyecto plantea las siguientes preguntas de investigación.

1.1.3. Pregunta de investigación

- ¿De qué forma se podrían programar las operaciones del proceso de fabricación de productos de mina, en una explotación a cielo abierto, para minimizar el costo de utilización de los EMS, en la Organización Corona?

1.1.4. Objetivo general

- Diseñar un modelo de programación de operaciones, del proceso de explotación, en una mina en cielo abierto de la Organización Corona, para minimizar el costo de utilización de los EMS en la fabricación de productos.

1.1.5. Objetivos específicos

- Realizar la revisión sistemática de literatura, con el fin de caracterizar los métodos de solución, funciones objetivo y restricciones asociados al problema de investigación.
- Identificar el estado actual del sistema de operaciones mineras, por medio de un diagnóstico global que permita establecer las oportunidades de mejora del sistema o de la operación minera a cielo abierto.
- Formular propuestas para la programación de operaciones mineras, por medio de modelos matemáticos que permitan minimizar el costo de utilización de los EMS en la fabricación de productos.
- Validar los modelos de programación matemática, por medio de la evaluación de diferentes escenarios, que permitan calcular el rendimiento de los costos, cuando se presentan

programaciones monoproducto y multiproducto, que consideren o la asignación de operadores.

- Analizar los resultados por medio de la comparación de escenarios, para establecer el nivel de rendimiento de las soluciones propuestas.

1.1.6. Justificación y delimitación

De acuerdo con la propuesta de valor de la división de insumos industriales Corona, uno de los focos de mejora es optimizar el costo en todo el proceso de abastecimiento, hasta la entrega del producto, buscando un proceso sencillo, ágil y fácil para el cliente. Por esta razón, es necesario realizar acciones para aprovechar al máximo el tiempo operativo de los EMS, donde se obtiene la producción real, ya que como se indicó en la caracterización y definición del problema, se presentan oportunidades de mejora en las metas de costos.

Dentro del contexto de insumos industriales Corona, la actividad minera es en una de las principales actividades de esta división, en la que se deben extraer los materiales para agregar valor a sus productos y cumplir los acuerdos de nivel de servicio con sus clientes. Es necesario destacar, que los EMS, son uno de los principales focos de costo dentro del sistema de operaciones mineras a cielo abierto, ya que sus costos de operación representan alrededor un 60% del costo total de venta. Por este motivo, se buscan estrategias que permitan mejorar el costo asociado a la utilización de los EMS.

En la figura 9 se aprecia el comportamiento del uso de los EMS durante el periodo enero a agosto de 2018, expresado en horas mensuales, donde se puede evidenciar un aumento progresivo en el valor y un incumplimiento de la meta de la empresa. Este aspecto como ya se mencionó, produce un sobrecosto en la operación minera, con su respectiva incidencia en la afectación del costo de producción y de venta de la mina.

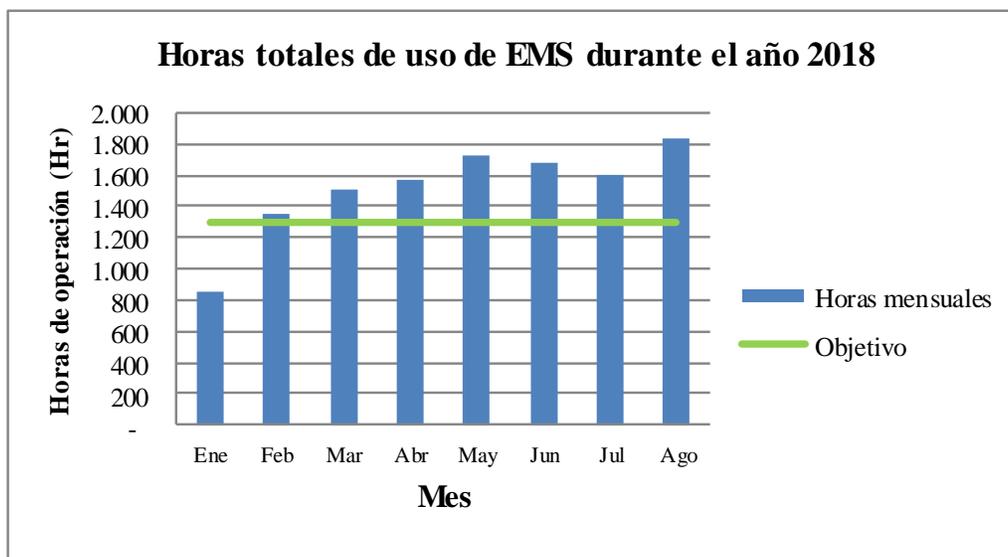


Figura 9. Horas de uso de EMS durante 2018. Fuente: Organización Corona.

Con el fin de cumplir las metas de producción dentro del tiempo operativo, la empresa debe cubrir ineficiencias por medio del alquiler adicional de los EMS. En la Figura 10, se muestra el costo asociado a la utilización de equipos alquilados y propios durante el 2018. Es importante destacar, que los EMS subcontratados facturan por hora efectiva trabajada.

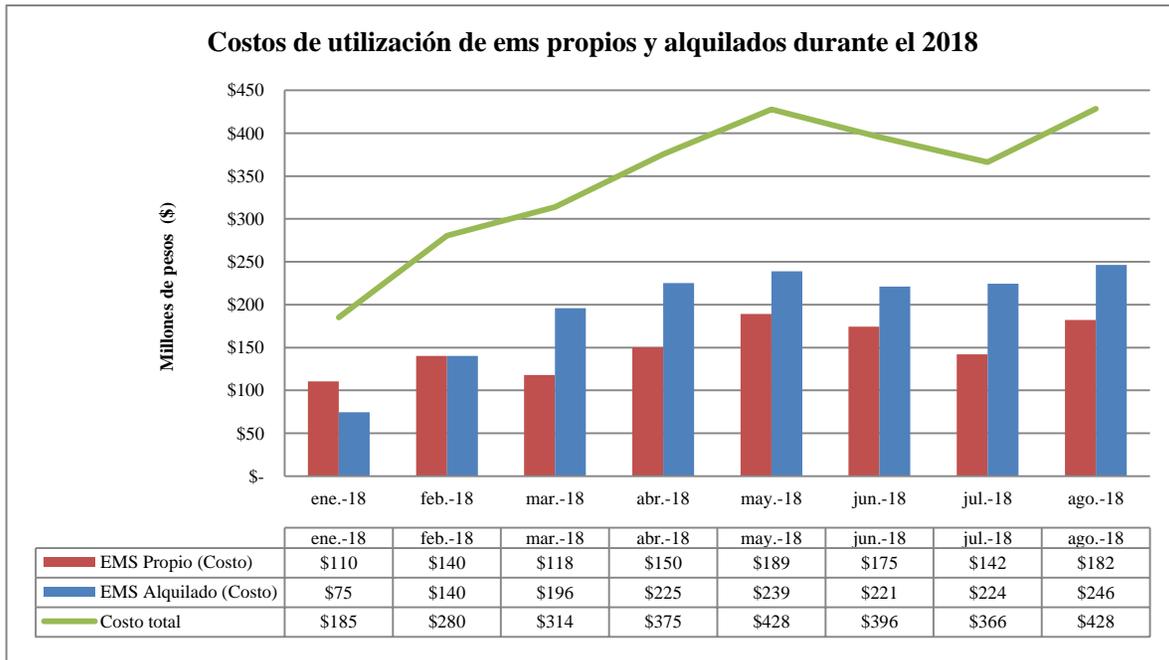


Figura 10. Costo de utilización de equipos alquilados durante el 2018. Fuente: Organización Corona.

En la Figura 11, se muestran los costos unitarios de venta del 2018 donde se aprecia el efecto del aumento de uso de los EMS propios y alquilados, al no cumplir los objetivos de costos de venta. Se resalta que en los meses de enero y marzo, el nivel de explotación de materiales estuvo bajo por un alto índice de inventarios y mantenimiento programado de equipos.

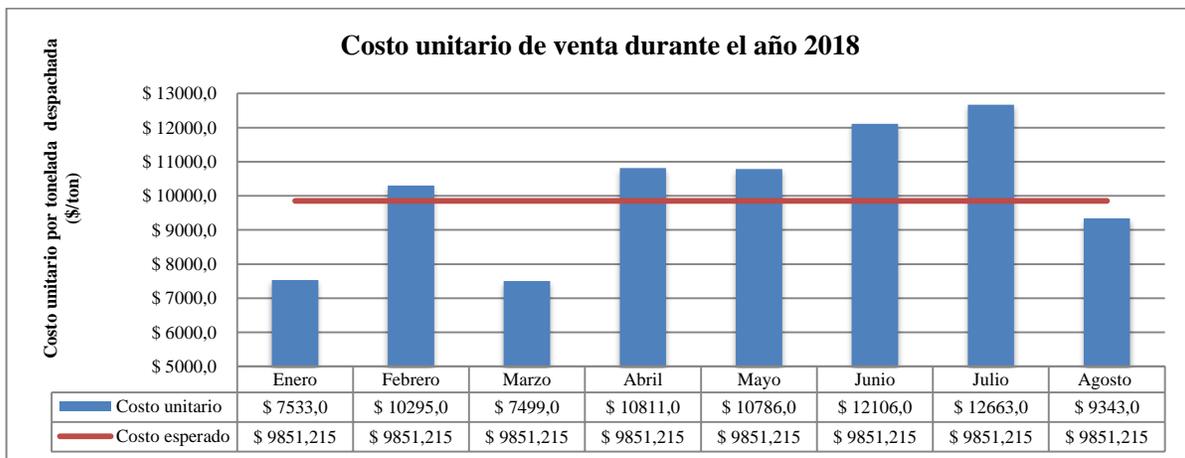


Figura 11. Costo unitario de venta durante el año 2018. Fuente: Organización Corona.

Dicho lo anterior, el presente proyecto se desarrollará en Corona, en la división de insumos industriales, en la mina a cielo abierto más grande de la organización y se enfocará en el diseño de un modelo de programación para minimizar el costo de la utilización de los EMS, que como se explicó, es primordial para el mejoramiento del costo de fabricación de productos de mina asociado a los mismos.

1.2. Metodología de investigación

1.2.1. Tipo de estudio

El presente estudio es del tipo descriptivo-aplicativo porque busca identificar las características de proceso real, para proponer mejoras desde el punto de vista académico, por medio de la aplicación de la modelación matemática y diseño experimental, con el fin de proveer a la empresa de instrumentos que le permitan tomar decisiones más eficientes (Bernal, 2010). Además, se considera un caso empresarial, para evaluar condiciones específicas de la programación de operaciones mineras en una mina a cielo abierto en Corona.

1.2.2. Fuentes y técnicas

La información será recolectada por medio de fuentes primarias como la observación directa, entrevistas y datos históricos del proceso; así como fuentes secundarias que incluyen artículos científicos publicados en revistas de alto prestigio y otros documentos como tesis y bitácoras de trabajo.

1.2.3. Método de investigación

El desarrollo del proyecto tendrá en cuenta las siguientes actividades:

- 1) Revisión sistemática de literatura asociada al problema. Esta etapa incluye:
 - Recolección de material
 - Análisis descriptivo
 - Selección de categoría
 - Resultados de revisión
 - Conclusiones

- 2) Recopilación de la información histórica del sistema de operaciones de la mina a cielo abierto, usando herramientas gerenciales, realización de un diagnóstico y elaboración de propuestas de mejora. Esta etapa incluye:
 - Descripción del sistema de gestión de operaciones
 - Descripción del método de diagnóstico
 - Definición de indicadores clave de proceso

- Medición de indicadores clave de proceso
 - Resultados del diagnóstico
 - Conclusiones y oportunidades de mejora
- 3) Planteamiento de modelos matemáticos. Esta etapa incluye:
- Definición de variables, función objetivo y restricciones
 - Programación de modelos
 - Validación
- 4) Realizar un diseño de experimentos utilizando software estadístico especializado. Esta etapa incluye:
- Definición de parámetros del experimento
 - Definición de instancias
 - Ejecución de las instancias en los modelos propuestos
 - Realizar pruebas estadísticas
- 5) Analizar y concluir sobre los resultados obtenidos.

2. Revisión de la literatura

En este capítulo se presenta una revisión sistemática de literatura (Seuring and Gold, 2012) sobre los métodos de solución del *Multi-Skill Resource-Constrained Project Scheduling Problem*, donde se busca desarrollar secuencialmente la recolección de material, un análisis descriptivo, la selección de las categorías asociadas a cada artículo, como la información general del artículo, el método de solución, la(s) medida(s) de rendimiento, restricciones, y por último, el análisis de resultados.

2.1. Recolección de material

En esta revisión de literatura, los criterios considerados en la recolección de material, son los artículos publicados en revistas académicas de alto impacto y la relevancia académica. De acuerdo con los criterios previos, se utilizaron las bases de datos *Scopus* y *Web of Science* por la relevancia y el alto impacto de su contenido. Se excluyen libros, actas de congresos, informes de proyectos y revistas profesionales. La revisión solo considera la literatura publicada entre 2001 y 2018 periodo que viene predeterminada en las bases de datos seleccionadas. Para facilitar este proceso, se estableció la siguiente cadena de búsqueda con las palabras clave del problema:

(system* OR model* OR method* OR procedure* OR solution* OR solv*) AND (multi* NEAR/1 skill*) AND ((resourc* NEAR/1 constr*) OR (project)) AND (scheduling)

2.2. Análisis descriptivo

En esta sección, se abordan los principales resultados derivados del análisis de las publicaciones seleccionadas, subdividido de acuerdo con los siguientes factores:

- Distribución de publicaciones por año.
- Principales revistas en las que se publicaron los artículos seleccionados.
- Metodologías de investigación específicas utilizadas en los artículos analizados.

2.3. Selección de categoría

A continuación, se muestran las categorías propuestas para clasificar los artículos de esta revisión los cuales son:

- (1) Información general del artículo: incluye el nombre de la revista y año de publicación.
- (2) Métodos de solución: abarca una clasificación de los modelos de solución.
- (3) Medidas de rendimiento: esta categoría se enfoca en las funciones objetivo que han sido optimizadas dentro de la literatura.
- (4) Características específicas: abarca los parámetros y restricciones más importantes de los modelos analizados.

2.4. Resultados de revisión

El resultado inicial con la cadena de búsqueda es de 41 artículos, de los cuales se seleccionan los más relacionados al problema de investigación, y en particular a las variables seleccionadas para la clasificación de la revisión sistemática de la literatura. Para efectos de dicha selección, se realizan filtros de acuerdo con el nivel de impacto de las revistas, así como la pertinencia del documento con los propósitos de esta investigación en torno al *Multi-Skill Resource-Constrained Project Scheduling*, generando un conjunto final de 23 artículos.

Adicional a lo encontrado en la cadena de búsqueda, se ubicaron otras contribuciones que no aparecen dentro del listado pero son importantes en la temática, como son el trabajo de Herroelen y Leus (2005), los cuales discutieron acerca de los métodos de programación de actividades en proyectos sometidos a incertidumbre con una estructura de evolución determinística de la red, y el trabajo de Demeulemeester y Herroelen (2006) confrontan la teoría y la práctica de la programación de proyectos y proporciona un marco de control y planificación de proyectos jerárquico y genérico que sirve para posicionar los diversos procedimientos de planificación de proyectos.

2.5. Multi-Skilled Resource-Constrained Project Scheduling

En la Figura 12, se puede ver el comportamiento de la publicación de artículos durante el periodo considerado en esta revisión. De acuerdo al comportamiento de las publicaciones se puede apreciar que los años donde más artículos se han publicado documentos sobre el MSRCSP es el periodo comprendido entre el 2012 y el 2018, exceptuando el año 2015 donde solo se aprecia un artículo publicado.



Figura 12. Distribución de publicaciones en el tiempo. Fuente: elaboración propia.

Además, en la Tabla 8 se muestran las principales revistas que han publicado artículos sobre el MSRCSP, en donde no se evidencia una fuente donde predominen las publicaciones, sin embargo,

se resaltan algunas como Journal of Scheduling, Expert System with Application, Automation in Construction, Computers & Chemical Engineering, Applied Soft Computing y OR Spectrum.

Tabla 8. Revistas científicas de la revisión de literatura. Fuente: elaboración propia

Nombre de la Revista	Cantidad
Applied soft computing	2
Automation in construction	2
Computers & chemical engineering	2
Expert systems with applications	2
International journal of production research	2
Journal of scheduling	2
Or spectrum	2
Annals of operations research	1
Computers & industrial engineering	1
Flexible services and manufacturing journal	1
Industrial engineering and management systems	1
International journal of advanced manufacturing technology	1
Mathematical problems in engineering	1
Soft computing	1
South african journal of industrial engineering	1
Swarm and evolutionary computation	1

En la Tabla 9, se muestran los contextos donde se han desarrollado soluciones del MSRCSP. Además, en la Figura 13, se puede ver que un 61% de los artículos, se centran en la programación de actividades y recursos en proyectos (PYT), también se puede ver que se han publicado un 13% de modelos centrados en empresas de tecnologías de información (IT) y un 9% en producción química (PQ), mientras que en mantenimiento (MTO), construcción (CNT) y E-commerce (EC), se han publicado menos documentos con un porcentaje de 4%, 5% y 4%, respectivamente.

Tabla 9. Contextos de aplicación del MSRCP. Fuente: elaboración propia.

AUTORES	IT	CNT	MTO	PYT	ECO	PQ	TM
Almeida et al. (2016)				x			
Attia et al. (2014)				x			
Correia et al. (2012)				x			
Correia y Saldanha-da-Gama (2014)				x			
Firat et al. (2014)				x			
Firat y Hurkens (2012)			x				
Gutjahr y Froeschl (2013)					x		
Heimerl et al. (2010)	x						
Javanmard et al. (2017)						x	
Kazemipoor et al. (2013)				x			
Kazemipoor et al. (2013)	x						
Li y Womer (2009)	x						
Liu (2012)				x			
Liu y Wang (2012)		x					
Maghsoudlou et al. (2016)				x			
Maghsoudlou et al. (2017)				x			
Myszkowski et al. (2015)							x

Gutjahr y Froeschl (2013)			x									
Heimerl et al. (2010)	X				x	x						
Javanmard et al. (2017)				x							x	
Kazemipoor et al. (2013)									x			
Kazemipoor et al. (2013)	X		x									
Li y Womer (2009)	X						x					
Liu (2012)												x
Liu y Wang (2012)	X											
Maghsoudlou et al. (2016)									x			
Maghsoudlou et al. (2017)	X			x					x	x		
Myszkowski et al. (2015)				x								x
Myszkowski et al. (2018)									x			
Qin et al. (2016)	X											
Wang y Zheng (2018)		X										
Wongwai y Malaikrisanachale (2011)								x				
Yannibelli (2011)									x		x	
Yannibelli y Amandi (2011)								x				

MIP: Mixed integer programing
FFA: Fruit fly optimization algorithm
HP: Heuristic procedure
GA: Genetic algorithms
RA: Random assignment
MCF: Maximum cost of first assignment
BDA: Benders Decomposition Algorithm
KGS: Knowledge-guided search
DEA: Differential evolutionary algorithm
MIA: Multi-Objective Invasive Weed Algorithm
PSP: Particle Swarm Optimization
ACO: Ant colony optimization

En la Figura 14, se aprecia que los modelos matemáticos de programación lineal entera, han sido los más utilizados por los autores, para solucionar el MSRCSP, seguido por los procedimientos heurísticos. Los métodos menos usados son *Benders Decomposition Algorithm* y *Multi-Objective Invasive Weed Algorithm*.

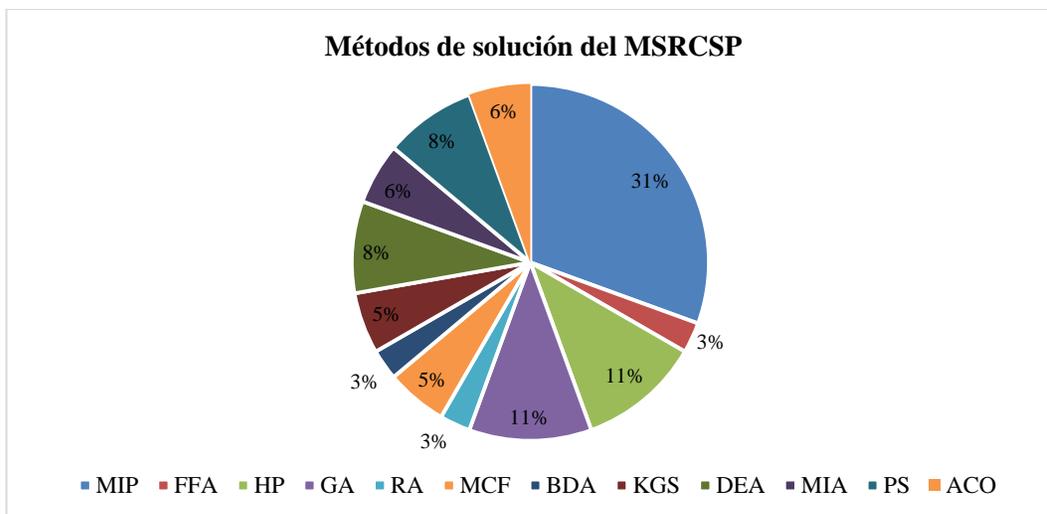


Figura 14. Métodos de solución del MSRCSP. Fuente: elaboración propia.

En la categoría de métodos de solución, se mencionan trabajos como el de Myszkowski et al. (2018) que presentan un algoritmo híbrido de evolución diferencial y codicioso, para resolver un problema de planificación de proyectos con recursos limitados y múltiples habilidades. Los autores examinan la representación indirecta especializada y la transformación del espacio de solución discreto al continuo. También, Maghsoudlou et al. (2017) investigan el problema de la programación de proyectos con recursos limitados y con múltiples habilidades con riesgo de reelaboración de cada actividad. El problema se formula matemáticamente como un modelo de optimización bi-objetivo para minimizar los costos totales de procesamiento de las actividades y para minimizar los riesgos de reelaboración de las actividades, al mismo tiempo. Los autores resuelven el problema, basados en un algoritmo genético, un enjambre de partículas multi-objetivo y un algoritmo de optimización de malezas invasivas multi-objetivo.

Maghsoudlou et al. (2016) estudian un nuevo problema de programación de proyectos con recursos limitados, multimodo y con tres objetivos. Los autores consideraron los siguientes objetivos: (1) minimizar la vida útil del proyecto, (2) minimizar el costo total de asignar trabajadores a habilidades, y (3) maximizar la calidad total de las actividades de procesamiento. Para resolver el problema, se propuso un algoritmo metaheurístico basado en un algoritmo genético, con una nueva estructura cromosómica que garantiza la viabilidad de las soluciones. Otros autores como Attia et al. (2016) presentan un modelo matemático mirando la línea de proyectos de varios períodos, considerando el problema de asignación de personal con dos grados de flexibilidad, en un contexto donde las duraciones esperadas de las actividades ya no están predefinidas, sino que son el resultado del desempeño de los operadores seleccionados para su ejecución. Los autores resuelven el problema mediante un algoritmo genético. Se presenta y analiza un ejemplo ilustrativo y se investiga la solidez del enfoque de resolución utilizando una muestra de 400 proyectos con diferentes características.

Se resalta el trabajo de Kazemipoor et al. (2013) que presentaron un modelo de programación lineal mixta para el MSRCPS e implementan un algoritmo de búsqueda de dispersión. Así como Yannibelli y Amandi (2011) que proponen un enfoque evolutivo basado en el conocimiento, para asignar el conjunto de empleados a cada actividad de proyecto. Y por último, Li y Womer (2009), quienes desarrollaron un algoritmo de descomposición de Benders híbrido, que combina las fortalezas complementarias de la programación lineal de enteros mixtos y la programación de restricciones, para resolver este problema de optimización NP-hard. Los autores diseñan un esquema de generación de cortes efectivo, basado en el análisis temporal en la programación de proyectos para resolver conflictos de recursos.

2.5.2. Medidas de rendimiento del MSRCP

Las funciones objetivo que se ha considerado en los artículos analizados son: la Duración del proyecto (DP), Desviación de tiempo (DT), Costos (CT), Riesgo (RG) y Calidad (CL). En la Tabla 11, se muestra el enfoque según el autor citado.

Tabla 11. Medidas de rendimiento del MSRCP. Fuente: elaboración propia.

AUTORES	Medidas de rendimiento				
	DP	DT	CT	RG	CL

Almeida et al. (2016)	x				
Attia et al. (2014)	x	x	x		
Correia et al. (2012)	x				
Correia y Saldanha-da-Gama (2014)			x		
Firat et al. (2014)			x		
Firat y Hurkens (2012)	x				
Gutjahr y Froeschl (2013)	x				
Heimerl et al. (2010)			x		
Javanmard et al. (2017)			x		
Kazemipoor et al. (2013)		x			
Kazemipoor et al. (2013)	x				
Li y Womer (2009)			x		
Liu (2012)	x		x		
Liu y Wang (2012)	x				
Maghsoudlou et al. (2016)	x		x		x
Maghsoudlou et al. (2017)				x	
Myszkowski et al. (2015)	x				
Myszkowski et al. (2018)			x		
Qin et al. (2016)	x				x
Wang y Zheng (2018)	x		x		
Wongwai y Malaikrisanachale (2011)	x				
Yannibelli (2011)	x	x	x		
Yannibelli y Amandi, (2011)	x				
DP: Duración del proyecto DT: Desviación de tiempo CT: Costos RG: Riesgo CL: Calidad					

En la Figura 15, se pueden apreciar las medidas de rendimiento que han sido estudiadas dentro de los artículos consultados; además se puede establecer que las variables más importantes son la duración del proyecto con un 47% y los costos con un 34%, mientras que las desviaciones del proyecto (10%), calidad (6%) y riesgos (3%), son enfoques menos frecuentes.

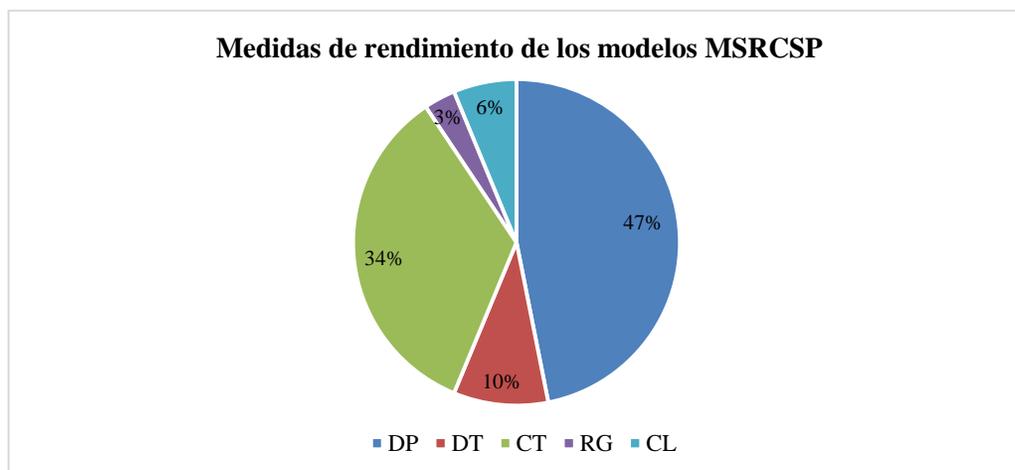


Figura 15. Medidas de rendimiento del MSRCSP. Fuente: elaboración propia.

Entre los trabajos que se resaltan en esta sección están, el de Wang y Zheng (2018) quienes proponen el *Fruit fly optimization algorithm* (FFA) con múltiples objetivos, guiado por el conocimiento, para el problema de programación de proyectos con recursos y múltiples habilidades, con el objetivo de minimizar el tiempo de ejecución y el costo total de manera simultánea. También, Javanmard et al. (2017) analizan en la industria de producción química, el problema de la programación de proyectos con múltiples habilidades, con el problema de inversión de recursos, que tiene como objetivo obtener una política óptima concurrente de programación de proyectos y reclutamiento de habilidades. Los autores desarrollan una formulación de programación entera para el problema y lo validan, mediante la resolución de varias instancias a pequeña escala en el software GAMS. También, se propone un algoritmo genético y de enjambres de partículas con parámetros calibrados y estructuras de cromosomas que garantizan la viabilidad.

En otro contexto, Firat et al. (2014) analizan la estabilidad en la asignación de personal de múltiples habilidades de técnicos y trabajos. Para esto, los autores proponen un modelo matemático de programación entera, para construir asignaciones óptimas y reducir costos de personal. Mientras tanto, Correia et al. (2014) proponen un modelo matemático para el problema de programación de proyectos de habilidades múltiples, orientado a los costos asociados con el uso de recursos y consideran costos fijos y variables. Finalmente, Wongwai y Malaikrisanachalee (2011) muestran un enfoque heurístico que simplifica el proceso de cálculo, para resolver la programación de recursos con múltiples habilidades y obtener la duración más corta del proyecto, considerando la prioridad de las tareas.

2.5.3. Características del MSRCP

Las principales restricciones que se han tenido en cuenta en la literatura son la Fuerza laboral (FL), Prioridad de las tareas (PT), Ponderación de los recursos (PT), Agrupación de actividades (AG), Reprocesos (RE) y Espacio continuo (EC). En la Tabla 12 se muestra la relación de restricciones y autores.

Tabla 12. Restricciones del MSRCP. Fuente: elaboración propia.

AUTORES	Restricciones					
	FL	PT	PR	AG	RE	EC
Almeida et al. (2016)			x	x		
Attia et al. (2014)	x					
Correia et al. (2012)	x					
Correia y Saldanha-da-Gama (2014)	x					
Firat et al. (2014)	x					
Firat y Hurkens (2012)	x					
Gutjahr y Froeschl (2013)	x					
Heimerl et al. (2010)	x					
Javanmard et al. (2017)	x					
Kazemipoor et al. (2013)	x					
Kazemipoor et al. (2013)						
Li y Womer (2009)	x					
Liu (2012)		x				
Liu y Wang (2012)	x					

Maghsoudlou et al. (2016)	x					
Maghsoudlou et al. (2017)	x				x	
Myszkowski et al. (2015)	x					
Myszkowski et al. (2018)						x
Qin et al. (2016)	x					
Wang y Zheng (2018)	x					
Wongwai y Malaikrisanachale (2011)	x	x				
Yannibelli (2011)	x					
Yannibelli y Amandi, (2011)	x					
FL: Fuerza laboral PT: Prioridad de las tareas PS: Ponderación de los recursos AG: Agrupación de actividades RE: Reprocesos EC: Espacio continuo						

En la Figura 16, se puede observar que la principal restricción del conjunto de artículos citados, es la fuerza laboral con un 76%, mientras que la prioridad de las tareas (8%), ponderación de recursos (4%), agrupación de actividades (4%), reprocesos (4%) y espacio continuo (4%), han sido menos utilizadas.

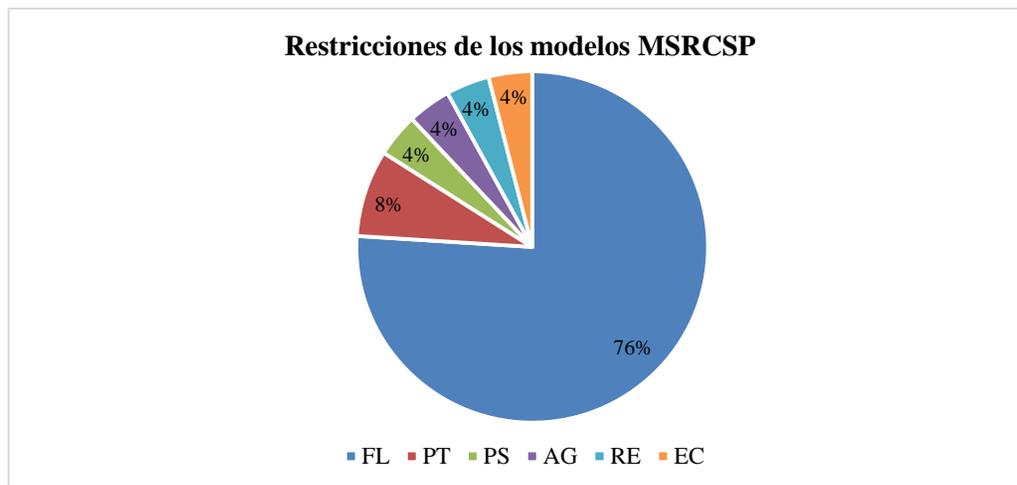


Figura 16. Restricciones del MSRCSP. Fuente: elaboración propia.

Entre los trabajos destacados, se encuentra el de Qin et al. (2016), quienes proponen un modelo de planificación de la fuerza laboral, para asignar tareas con múltiples habilidades al considerar el aprendizaje del conocimiento y los requisitos de la calidad del proyecto. También, Almeida et al. (2016) proponen una heurística de programación paralela, para el problema de programación de proyectos con recursos restringidos de habilidades múltiples.

A su vez, Liu y Wang (2012) proponen un modelo de optimización de la duración del proyecto y al mismo tiempo introduce el concepto de habilidades múltiples para integrar equipos de habilidades únicas / múltiples, con el objetivo de mejorar el rendimiento en el trabajo. Además, para mejorar la eficiencia de la resolución de problemas, la programación de restricciones (CP) se utiliza para manejar problemas complejos de programación combinatoria, y se implementan varias reglas heurísticas relacionadas con las programaciones. La optimización basada en CP minimiza la

duración del proyecto, mientras que dos tipos de tripulación, incluyendo tripulaciones con habilidades únicas y con múltiples habilidades, están integradas en el modelo propuesto.

Adicionalmente, Kazemipoor et al. (2013) presentan un nuevo modelo de programación de objetivos, para el problema de planificación de la cartera de proyectos con múltiples habilidades y múltiples objetivos. Se analizan restricciones de precedencia que tienen como objetivo encontrar una desviación mínima del tiempo esperado, para completar cada proyecto y la asignación de recursos por medio de un algoritmo metaheurístico eficiente, basado en la evolución diferencial.

Igualmente, Gutjahr y Froeschl (2013) presentan un modelo de optimización para la selección de la cartera de proyectos. Los autores analizan la incertidumbre de establecer los esfuerzos reales necesarios para la ejecución de los trabajos y la asignación del trabajo a recursos humanos, así como la distribución del trabajo a lo largo del tiempo, con fuerza de trabajo multicalificada. Además, Correia et al. (2012) presentan una formulación de programación lineal de enteros mixtos y un procedimiento heurístico para el problema de programación de proyectos con recursos limitados, en el que los recursos son flexibles.

De igual forma, Firat y Hurkens (2012) abordan la programación de tareas complejas con un conjunto no homogéneo de recursos. El problema consiste en asignar técnicos a tareas con requisitos de habilidades de múltiples niveles, los cuales poseen las capacidades necesarias y permanecen juntos durante la duración de un día de trabajo. Los autores plantean construir horarios con un modelo de coincidencia flexible que selecciona las tareas a procesar y a su vez forma grupos de técnicos asignados a combinaciones de tareas mediante un modelo de programación de enteros mixtos. Este modelo es capaz de revisar las asignaciones técnico-tarea.

Por último, Heimerl y Kolisch (2010) consideran la programación simultánea de múltiples proyectos y su personal, con una fuerza de trabajo humana, con múltiples habilidades con eficiencias heterogéneas y estáticas, con el objetivo de minimizar los costos laborales. Los autores propusieron un modelo de programación lineal de enteros mixtos (MIP) con un límite de LP ajustado.

2.6. Conclusiones del capítulo

En este capítulo se presentó la literatura asociada al MSRCPSP, donde se aprecia una amplia aplicación a problemas asociados en su mayoría, a métodos de solución con programación entera mixta (MIP), buscando minimizar la duración del proyecto y usando como principal restricción la fuerza laboral y el costo. En términos investigativos, se encuentran oportunidades en la generación de modelos enfocados en la reducción de costos donde los recursos se consideren como equipos especializados con diversas capacidades, para realizar varias tareas en lugar de personal con múltiples habilidades.

Además, en este proyecto, se busca profundizar en una oportunidad identificada en la literatura, la cual consiste en la integración de actividades con requerimientos de múltiples habilidades, donde se puedan asignar diferentes equipos desde una perspectiva de reducción costos, integrando

parámetros como tiempos de entrega, disponibilidad de horas de uso a nivel global y específico de los equipos, así como la adaptación de la demanda y el rendimiento específico de cada equipo para realizar cada habilidad.

3. Diagnóstico del sistema de operaciones mineras

En este capítulo se propone definir un método de diagnóstico, a partir del análisis del sistema de gestión de operaciones de la división de insumos industriales, definiendo los indicadores claves del proceso, midiendo su desempeño en lo corrido del último año, para así, identificar las brechas u oportunidades de mejora para la realización del modelo de programación.

El modelo de diagnóstico está centrado en los factores que influyen directamente en la programación de los EMS. Se busca que los resultados permitan realizar un análisis al interior de las operaciones y poderlos calificar cuantitativamente según los resultados obtenidos.

La organización Corona inició en enero de 2017 un proyecto estratégico, con el objetivo de actualizar el modelo operativo de la organización, teniendo en cuenta: los objetivos de cumplimiento de la meta del año 2016 al 2025, la complejidad en el proceso de internacionalización, la entrada en el negocio del cemento y la entrada del nuevo sistema de información. Fruto de ello, se establecieron cuatro divisiones de negocios de manufactura: Baños y Cocinas; Superficies, Materiales y Pinturas; Insumos Industriales y Manejo de Energía; y Mesa Servida; además de dos unidades comerciales que son Almacenes Corona y Comercial Corona Colombia y cinco unidades de soporte transversal. Por esta razón, las divisiones de la organización se enfrentaron al reto de redefinir sus modelos de gestión de operaciones y esto conllevó a desarrollar metodologías basadas en Mantenimiento Productivo Total (TPM).

De acuerdo con el JIPM (*Japan Institute of Plant Maintenance*), el TPM se orienta a crear un modelo corporativo que maximiza la eficiencia de todo el sistema productivo, estableciendo un sistema que previene todas las pérdidas en todas las operaciones de las empresas. Esto incluye cero accidentes, cero defectos y cero fallos en todo el ciclo de vida del sistema productivo. Esta metodología se aplica en todos los sectores, incluyendo producción, desarrollo y departamentos administrativos. La metodología se apoya en la participación de todos los integrantes de la empresa, desde la alta dirección, hasta los niveles operativos. La obtención de cero pérdidas, se logra a través del trabajo de pequeños grupos primarios (PGP) los cuales se encargan de ejecutar las actividades de los procesos productivos (López, 2009).

El TPM ha sido abordado en investigaciones relevantes como la realizada por Lopez (2009), quien resalta que esta metodología se centra en la eficacia total, la cual busca la eficiencia económica y la rentabilidad del sistema; el mantenimiento total, que consiste en mejorar la prevención de los procesos de mantenimiento; y la participación total de todos los empleados o pequeños grupos en cada departamento a cada nivel. Por esta razón, la búsqueda de interacción entre mantenimiento y producción ha sido de gran intensidad en las industrias manufactureras, considerando que con el TPM es posible mejorar la productividad de una manera global (Rodrigues y Hatakeyama, 2006).

El TPM requiere utilizar un conjunto de indicadores clave de rendimiento (KPI) enfocados en la medición de las pérdidas. Por este motivo, se resaltan trabajos como el de Zhu et al. (2014), donde definen los KPI como medidas cuantificables y estratégicas que reflejan los factores críticos de éxito en operaciones industriales, los cuales son muy importantes para comprender, comparar y

mejorar el rendimiento del sistema desde la perspectiva operacional asociada a la eliminación del desperdicio y la perspectiva corporativa para alcanzar los objetivos estratégicos del negocio.

Como este capítulo se enfoca en utilizar los KPIs del TPM, como herramientas de diagnóstico de un sistema de operaciones, se resaltan trabajos relevantes enfocados en métodos de diagnóstico, como el desarrollado por Lanza et al. (2017), quienes realizaron un análisis de 20 indicadores clave de rendimiento para investigar sus posibles impactos, al maximizar el tiempo de actividad de una línea de ensamblaje simulada, con automatización e inspección de calidad. También, Zhu et al. (2014) proponen un modelo de coordinación multi-KPI disponible para discernir y equilibrar la relación entre estos. Así como Jasiulewicz-Kaczmarek (2016), introduce la aplicación del análisis de debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas (DOFA) para el diagnóstico del sistema de mantenimiento y la identificación de las direcciones de las acciones estratégicas de la empresa dentro del área de mantenimiento.

3.1. Sistema de gestión de operaciones

De acuerdo con Henríquez Machado (2015), las metodologías enfocadas en la excelencia de operaciones, como el *Sistema de Producción Toyota*, *Kaizen*, *Just in Time*, *Lean Manufacturing* y *Six Sigma*, tienen en común, el mejoramiento continuo para reducir desperdicios y la minimización de costos, lo cual va de la mano, con la alineación de la operación y la estrategia del negocio, las cuales son medidas a través de la aplicación rigurosa de indicadores de gestión claros, con metas bien definidas. En la tabla 13, se describen las metodologías más relevantes en la actualidad.

Tabla 13. Metodologías de excelencia operacional. Fuente: Adaptado de Henríquez Machado (2015).

METODOLOGÍA	ORIGEN Y AUTORES	DEFINICIÓN	CARACTERÍSTICAS
Sistema de Producción Toyota	Las prácticas de gerencia japonesa estudiadas por Taiichi Ohno en Toyota. (Holweg, 2007)	Se define como un grupo de técnicas de reducción de problemas y diseño estructural del trabajo enfocado hacia el aumento del desempeño de la producción (Jayaram et al., 2010).	Según Liker (2004): Crear procesos de flujo continuo. Utilizar sistemas de “empuje” para evitar sobreproducción. Balancear la carga de trabajo. Construir una cultura de paro para reparar los defectos. Estandarizar las tareas. Utilizar el control visual. Utilizar únicamente tecnología confiable y testeada, que sea útil para las personas y los procesos.
Kaizen	Después de la segunda guerra mundial, pero a finales de la década de 1950 y principios de 1960, esta metodología fue acogida por expertos como W.E. Deming y J.M. Juran (Imai, 1986).	Mejoramiento continuo que involucra a todos, incluyendo tanto a los gerentes como a los trabajadores (Imai, 1986).	Según Imai (1986): Enfoque al proceso y un sistema administrativo que apoya y reconoce los esfuerzos de la gente orientada al proceso para el mejoramiento. Orientación al cliente.
Just in Time	Sistema de producción Toyota	Satisfacción de las necesidades del cliente,	Según Liker (2004): Busca la eliminación completa de toda

	(Liker, 2004)	apoyándose en la aplicación de las 5S como fórmula que diferencie a la compañía de sus competidores (Hirano, 1995).	clase de desperdicios filtrados por todas partes en la mayoría de las fábricas. Ayuda a producir con el ánimo de llegar a la satisfacción de los clientes (Liker, 2004 Hirano, 1990)
Lean Manufacturing	A principios del siglo XIX cuando se estableció el concepto de producción en masa en las plantas de Ford. (Bhuiyan & Baghel, 2005).	Es un enfoque sistemático para definir y eliminar el desperdicio siguiendo el producto al ritmo de empuje del cliente, persiguiendo la perfección (Bhuiyan & Baghel, 2005).	Según Bhuiyan & Baghel (2005): Mantener un flujo continuo de los productos en las fábricas. Ajustarse de forma flexible a los cambios de la demanda. Eliminación de desperdicios.
Six Sigma	Estados Unidos, 1986, cuando Motorola Inc. la introdujo con el propósito de medir la calidad de los procesos (Eckes, 2004).	Método organizado y sistemático para mejorar estratégicamente los procesos, productos y servicios por medio de métodos estadísticos y el método científico para reducir radicalmente la tasa de defectos de las especificaciones que el cliente ha definido (Eckes, 2004).	De acuerdo con Bhuiyan & Baghel, (2005): Reducir la variación en todos los procesos de la organización. Emplea el ciclo DMAIC (Definir oportunidades, Medir el desempeño, Analizar oportunidades, Mejorar el desempeño y Controlar el desempeño).
TPM	En 1960, en Nippondenso, empresa japonesa proveedora del sector automotriz, se complementa al mantenimiento preventivo con el mantenimiento productivo, se le da más importancia a la fiabilidad para la entrega de servicio al cliente (López, 2009).	El TPM se orienta a crear un sistema corporativo que maximiza la eficiencia de todo el sistema productivo, estableciendo un sistema que previene todas las pérdidas en todas las operaciones de las empresas (López, 2009).	Busca obtener cero pérdidas, mejorando el rendimiento de los equipos cotidianamente y evitando desperdicios que se presenten en cualquier tipo de actividad que se desarrolle en la organización, utilizando siempre efectivamente la capacidad instalada. (López, 2009).

El método propuesto de diagnóstico se basa en el modelo Kaizen o de mejora continua, el cual plantea que el cliente es el eje principal para el cumplimiento de la estrategia, a través del suministro de productos y/o servicios cumpliendo la promesa de costo, calidad y entregas. Para esto se debe partir de la medición del desempeño a través de indicadores de gestión. La Figura 17, muestra la estructura del modelo Kaizen.



Figura 17. Estructura del modelo Kaizen. Fuente: Organización Corona.

El TPM hace parte de las herramientas de gestión integral (SGI) de la Organización Corona, el cual para su implementación, tiene en cuenta nueve pilares o focos de trabajo, los cuales se muestran en la Figura 18. De estos nueve pilares, el pilar de mejoras enfocadas, recoge los objetivos de costo, entregas, eficiencia y mejoramiento continuo, por ello, este pilar se convierte en la base de trabajo para el diagnóstico del sistema de operaciones.

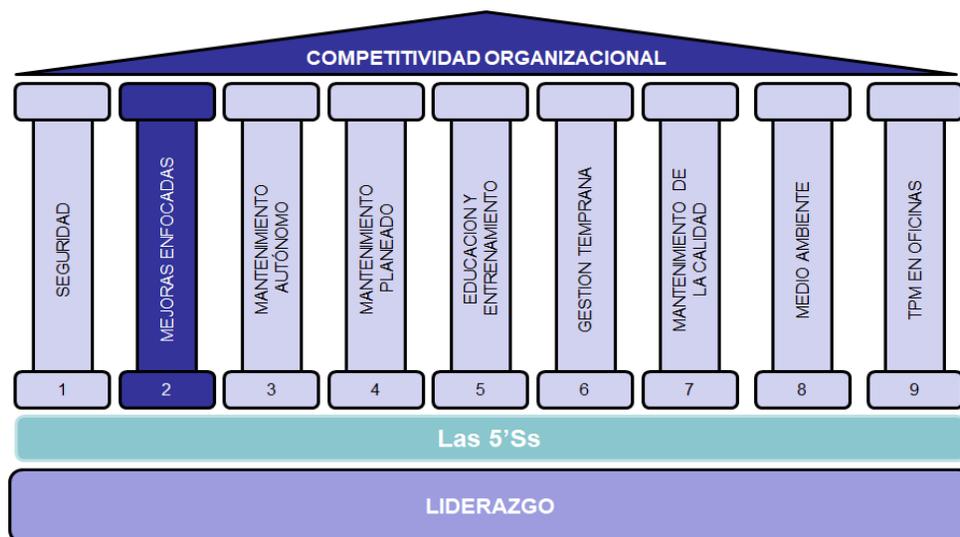


Figura 18. Pilares metodología TPM en Organización Corona. Fuente: Organización Corona.

El pilar de mejoras enfocadas, busca el desarrollo de una cultura de mejoramiento continuo en todos los niveles de la organización, además de la realización de proyectos de mejora que generen impacto para maximizar la eficiencia general de los equipos. Adicionalmente, brinda acompañamiento desde la base de las operaciones, y así aumentar la capacidad, seguridad y productividad.

3.2. Descripción del método de diagnóstico

Este método inicia con la recolección de datos actuales de las variables de rendimiento, los cuales son los KPI del pilar de mejoras enfocadas. Después, se realiza un conteo de las veces que se logran las metas y las veces que no se alcanza dicha meta. Por último, se procede a realizar un análisis y consolidación de resultados. Este método de diagnóstico, busca plantear recomendaciones y observaciones desde la óptica de optimización, que permitan dar cumplimiento a las necesidades de disminución de costo asociada a la utilización de los EMS en la mina de estudio. La Figura 19 muestra el proceso descrito.

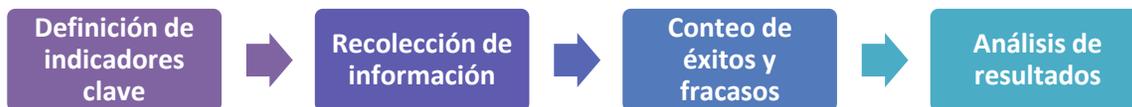


Figura 19. Proceso del método de diagnóstico. Fuente: elaboración propia.

3.3. Definición de indicadores clave

Los objetivos representan un estado deseado que se requiere alcanzar dentro de las organizaciones, estos se pueden clasificar en mejoramiento, realización o mantenimiento, dependiendo de su intención. Por lo anterior, una relación explícita entre ambos, asegura la concordancia entre lo que se quiere medir y lo que se está midiendo (Villa, 2015). Por otra parte, Rodríguez y Gomez (1991) sustentan que para las empresas de manufactura, resulta importante la satisfacción del cliente, la efectividad en el cumplimiento de sus compromisos, la eficiencia en el uso de recursos y el mejoramiento y motivación del recurso humano, por lo cual, deben gestionar indicadores de productividad eficiencia, calidad, costos, seguridad y motivación. También para Gupta (2015), la implementación de TPM es una forma de lograr mejorar el rendimiento enfocado a factores como la productividad, calidad, bajo costo y cortos plazos de entrega. Por este motivo, son seleccionados los KPIs, enfocados a la medición de estos factores, a través del pilar de mejoras enfocadas de TPM.

Dentro de los objetivos de trabajo, del pilar de mejoras enfocadas, se puede mencionar el de reducir las pérdidas encontradas en cada uno de los procesos, realizar mejoras enfocadas a las pérdidas más significativas en cada uno de los procesos, gestionar cada uno de los indicadores, acompañar a los procesos en la identificación de las pérdidas críticas, además de la priorización y diseño de planes de acción para la disminución o eliminación de estas. El presente diagnóstico, se basa en el análisis del impacto que tienen los indicadores clave de actividad (KAI) sobre los KPIs y éstos a su vez sobre los indicadores clave de alta dirección (KMI) de la organización. La estructura de indicadores del pilar de mejoras enfocadas se muestra en la Figura 20.

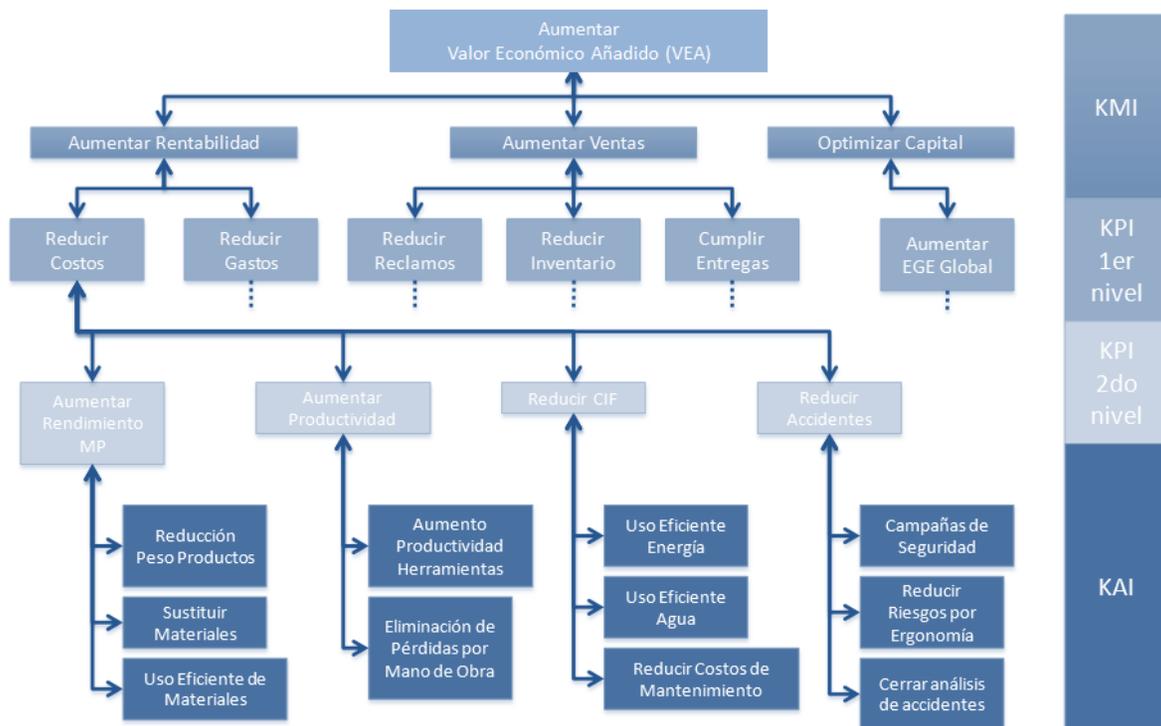


Figura 20. Estructura de indicadores del pilar de mejoras enfocadas del TPM. Fuente: Organización Corona.

Con base en lo dicho por Rodríguez y Gomez (1991), los indicadores de gestión más relevantes en manufactura son productividad, calidad, costos, entregas, seguridad y motivación. Dentro del alcance de este método de diagnóstico, se considera desarrollar un modelo que servirá de base para la evaluación del sistema de gestión de operaciones de la mina objeto de estudio. Considerando que la seguridad y motivación no son factores relevantes en el modelo de programación de operaciones, se descartan de este método.

En la organización, aparte de los ya mencionados KPI, se gestionan los KMI, los cuales corresponden a indicadores de alta dirección, basados sobre resultado, con los cuales se evalúa el desempeño de las directrices, políticas y estrategias de la compañía. También se gestionan los KAI, los cuales son indicadores para las actividades que permiten controlar día a día, las actividades necesarias para alcanzar las metas globales de la empresa. La Figura 21 muestra los indicadores que se tendrán en cuenta para la ejecución del diagnóstico, tomando como base los de primer y segundo nivel, y además, se muestran las variables que se tendrán en cuenta para la evaluación.

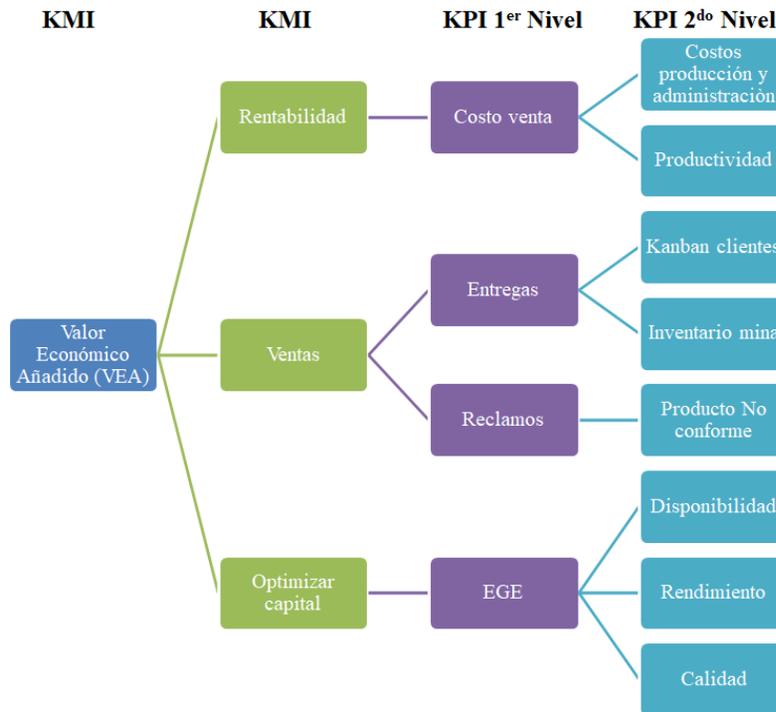


Figura 21. Elementos del diagnóstico .Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 14, muestra la descripción de los indicadores seleccionados, su unidad de medida, su descripción y su forma de cálculo.

Tabla 14. Descripción de indicadores. Fuente: elaboración propia.

INDICADOR	TIPO	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	MÉTODO DE CÁLCULO
Costo de venta	KPI1	%	Costo de producir los bienes vendidos	$\frac{\text{Costo de producción} + \text{Costo administrativo}}{\text{Cantidad Entregada}}$
Costo producción y administración	KPI2	\$	Costos directos e indirectos asociados a la operación minera	$\text{Costos directos} + \text{Costos indirectos}$
Productividad	KPI2	Toneladas/hora	Capacidad de producción por unidad de trabajo	$\frac{\text{Cantidad Entregada}}{\text{Horas Totales Máquina}}$ $\frac{\text{Cantidad Entregada}}{\text{Horas Totales Hombre}}$
Entregas	KPI1	Toneladas	Relación entre lo despachado al cliente respecto a lo solicitado	$\frac{\text{Cantidad Entregada}}{\text{Cantidad Demandada}}$
Kanban Clientes	KPI2	%	Relación entre el almacenamiento en patios del cliente respecto a la capacidad	$\frac{\text{Cantidad Almacenada}}{\text{Capacidad Almacenamiento}}$

Nivel inventario	KPI2	Meses	Meses de inventario en mina de productos aprobados	$\frac{\text{Stock producto terminado}}{\text{Cantidad demandada}}$
Reclamos	KPI1	Unidad	Notificaciones del cliente por producto no conforme en plantas	NA
Producto no conforme	KPI2	%	Producto rechazado por incumplimiento de especificaciones o defectos	$\frac{\text{Toneladas defectuosas}}{\text{Toneladas producidas}}$
EGE	KPI1	%	Eficiencia global de equipos	$\text{Disponibilidad} * \text{Calidad} * \text{Rendimiento}$
Disponibilidad	KPI2	%	Tiempo de funcionamiento real del equipo respecto al tiempo programado	$\frac{\text{Tiempo Programado} - \text{Paros}}{\text{Tiempo Programado}}$
Rendimiento	KPI2	%	Cuanto se ha producido en el tiempo de funcionamiento real	$\frac{\text{Producción Real}}{\text{Producción Programada}}$
Calidad	KPI2	%	Cantidad buena producida a la primera respecto a la cantidad total producida	$\frac{\text{Producción Aprobada}}{\text{Producción Real}}$

Entonces, el método planteado realizará un conteo de las veces que el indicador logra y no logra la meta planteada desde la planeación estratégica. Posterior al conteo, se realiza una tabla de frecuencias para establecer a qué indicadores se les debe prestar una atención especial, con el fin de mejorar el sistema global de desempeño del sistema de operaciones.

3.4. Medición de indicadores clave

La metodología aquí aplicada, parte del estudio y entendimiento de la estrategia, además del estado vigente de su oferta de producto frente a la proyección de demanda dentro del sistema de operaciones de la División de Insumos Industriales. En ese orden de ideas, se ejecuta el proceso de definición de objetivos internos de la metodología TPM y la recolección de datos, para después realizar los distintos análisis planteados. Los datos analizados, corresponden al periodo comprendido entre enero y agosto de 2018, periodo en el que se recolectó la información disponible en la empresa.

3.4.1. Análisis de costo de venta

La Figura 22, muestra el comportamiento de las ventas en toneladas (con el eje izquierdo de la gráfica, en barras) y el cumplimiento del costo de ventas de manera porcentual (con el eje derecho de la gráfica en línea continúa), con respecto al objetivo. Se puede apreciar que este indicador no se está cumpliendo ya que el promedio del 2018 muestra un 7% por encima del objetivo, lo cual implica una oportunidad para analizar los costos operacionales generados por la programación de EMS.

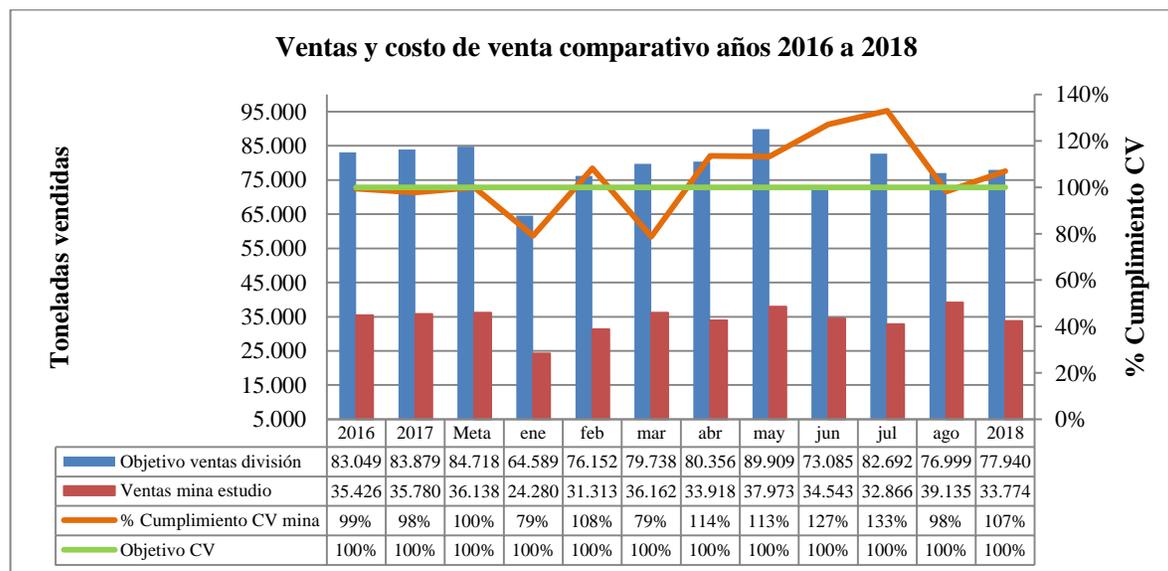


Figura 22. Ventas y costo de venta comparativo. Fuente: Organización Corona

3.4.1.1. Costo de producción y administración

En cuanto al factor de análisis de costos, se presenta el comportamiento de la ejecución del presupuesto, en la Figura 23. Las barras con el eje izquierdo de la gráfica representan el presupuesto y costo real ejecutado, y la línea verde con el eje derecho el porcentaje de cumplimiento del presupuesto.

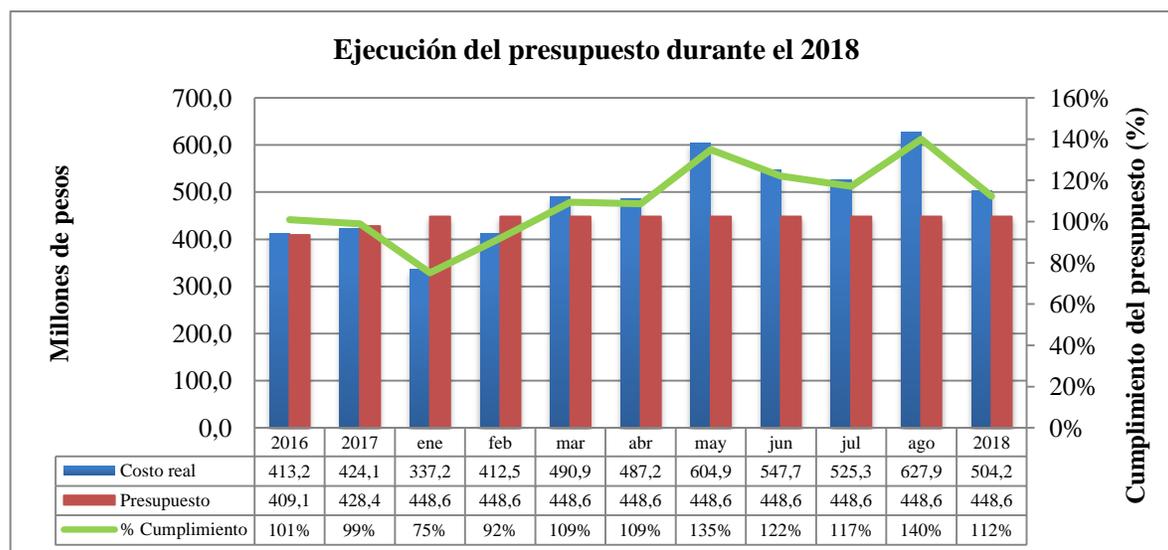


Figura 23. Ejecución del presupuesto durante el 2018. Fuente: Organización Corona.

Se puede apreciar que no se está cumpliendo el objetivo asociado a la ejecución del presupuesto del año 2018, estando por encima en un 40%, lo cual, constituye un incumplimiento dentro de los objetivos empresariales. Según datos de la empresa, este sobre costo está influenciado por el aumento del uso de los EMS en las operaciones mineras.

3.4.1.2. Análisis de productividad

El factor productividad se mide considerando la cantidad de toneladas por hombre por turno y cantidad de toneladas por hora-máquina. En la Figura 27, se muestra la productividad asociada a la mano de obra y máquinas disponibles. Las barras azules con el eje izquierdo de la gráfica representan el total de horas de operación de los EMS, mientras que las líneas verde y roja con el eje derecho muestran la productividad en toneladas por hora para los EMS y para la mano de obra respectivamente.

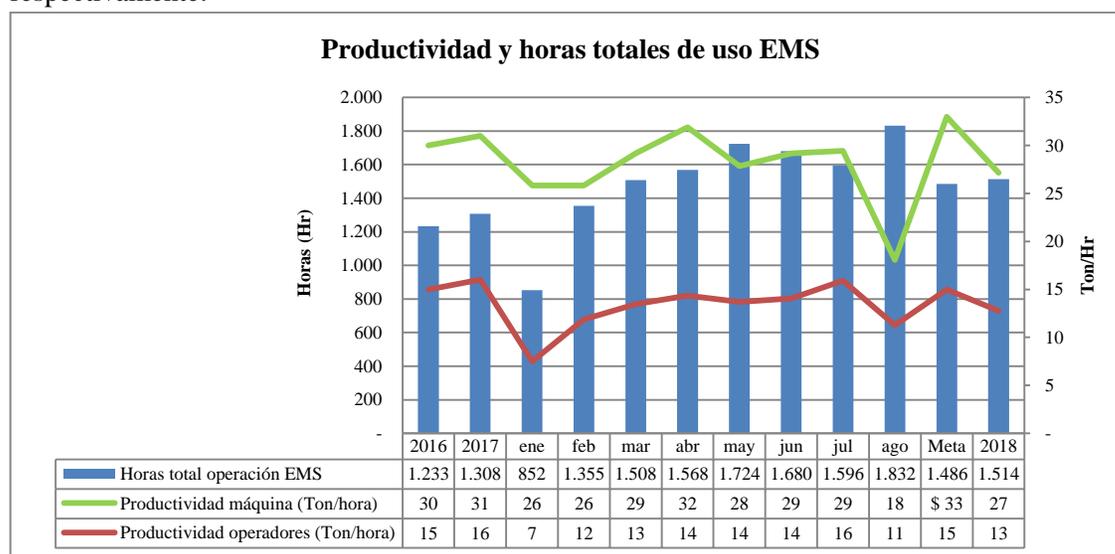


Figura 24. Productividad de la mina objeto de estudio. Fuente: Organización Corona.

Se aprecia el indicador de forma comparativa contra el histórico y el objetivo planteado para el año 2018 y se puede observar que no se está cumpliendo el objetivo y que hay una tendencia histórica a la disminución. Esto se presenta, según los análisis de causa raíz realizados por parte de los encargados de la operación, debido a un bajo rendimiento de los EMS, producto de la falta de una adecuada programación de los EMS.

3.4.2. Análisis de entregas

La variable de cumplimiento de entregas, se muestra en la Figura 25. Las barras con el eje izquierdo de la gráfica muestran el comportamiento del objetivo de entregas contra el ejecutado en toneladas, y la línea verde con el eje derecho expresa el cumplimiento de este objetivo en porcentaje. Se puede apreciar que el promedio de entregas de 2018 se encuentra en un 93,5% de cumplimiento respecto al objetivo.

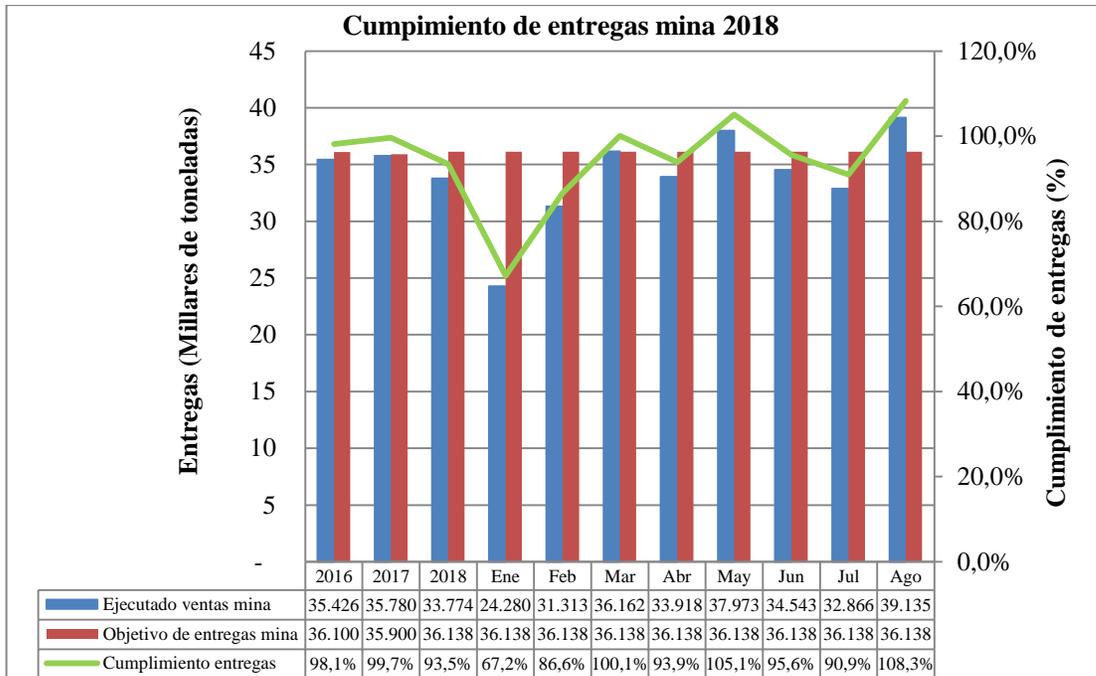


Figura 25. Cumplimiento de entregas. Fuente: Organización Corona

3.4.2.1. Kanban Clientes

El comportamiento de este indicador se muestra en la Figura 26. Se presentan los tres clientes de la mina en estudio, y se aprecia incumplimiento del indicador con respecto al objetivo trazado para 2018. Este incumplimiento está influenciado por el indicador de entregas analizado anteriormente.

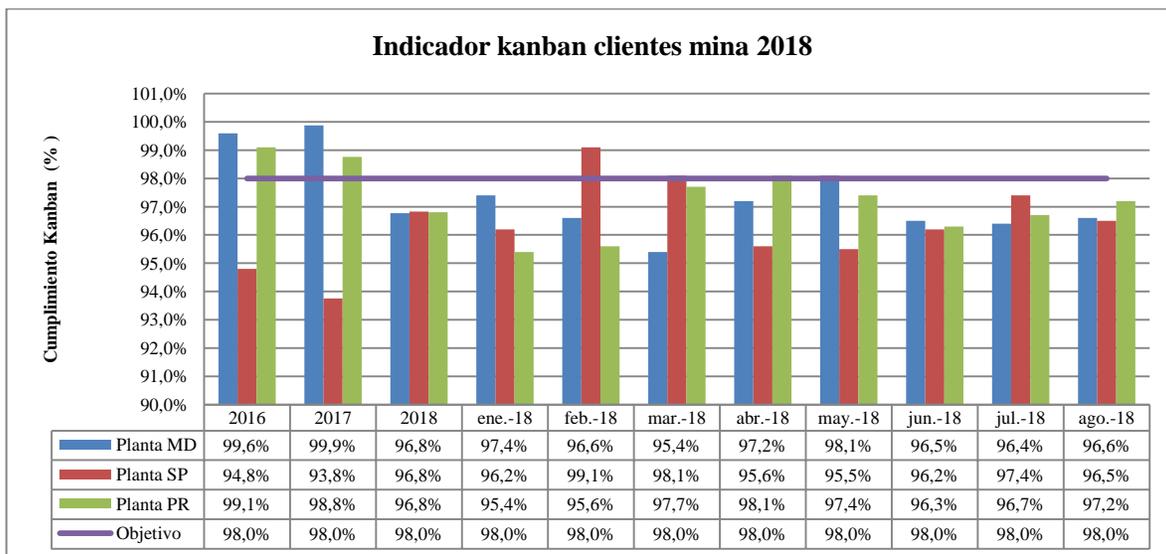


Figura 26. Indicador Kanban clientes mina. Fuente: Organización Corona

3.4.2.2. Nivel de Inventario mina

La Figura 27 muestra el nivel de inventario de la mina objeto de estudio. Las barras muestran con el eje izquierdo el objetivo y dato real de inventario en toneladas y las líneas verde y naranja con el eje derecho, el objetivo y dato real en meses. Se aprecia una tendencia de disminución del nivel de inventario lo cual pone en riesgo el cumplimiento de las ventas.

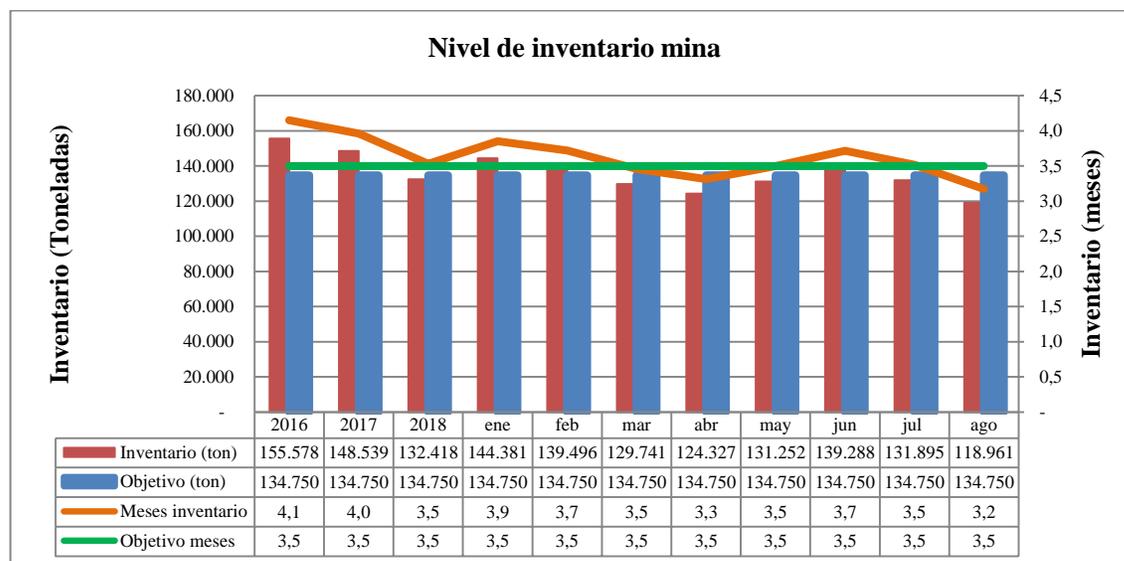


Figura 27. Nivel de inventario de producto mina. Fuente: Organización Corona.

3.4.3. Reclamos

Este indicador ha tenido un excelente comportamiento, ya que desde el año 2014 no se presentan reclamos por parte de los clientes.

3.4.3.1. Producto no conforme

La Figura 28, muestra el comportamiento del producto no conforme, con un excelente resultado desde el año 2014.

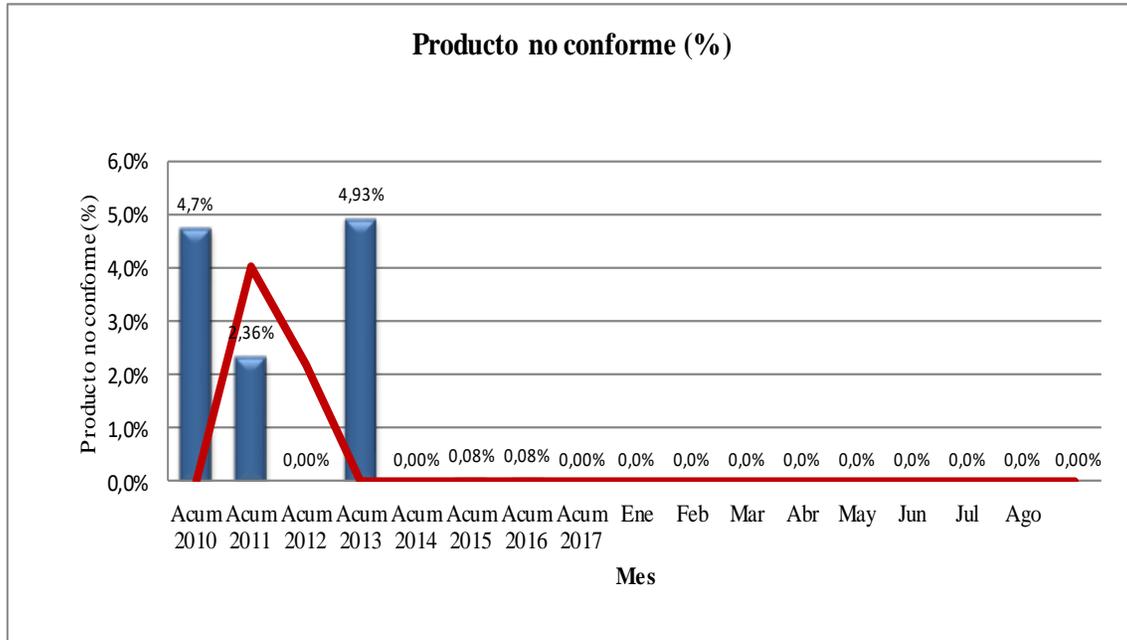


Figura 28. Producto no conforme mina. Fuente: Organización Corona.

3.4.4. Eficiencia global de equipos (EGE)

Este factor corresponde a la eficiencia de los equipos, mientras estuvieron disponibles, produciendo calidad a la primera, con un rendimiento esperado. La Figura 29, muestra el comportamiento histórico y el del año 2018. Se aprecia al igual que en la productividad, una tendencia a la disminución y un incumplimiento del objetivo planteado para el año 2018.

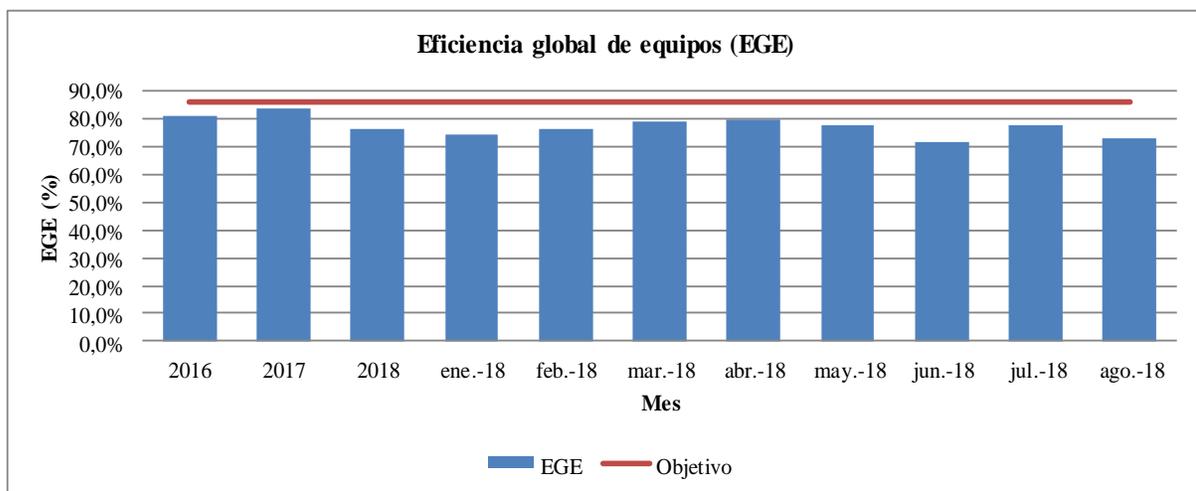


Figura 29. Comportamiento del EGE en la mina objeto de estudio. Fuente: Organización Corona.

3.4.4.1. Disponibilidad de equipos

La Figura 30, muestra el comportamiento de la disponibilidad de los equipos, apreciándose un cumplimiento en el promedio año 2018, con respecto al objetivo.

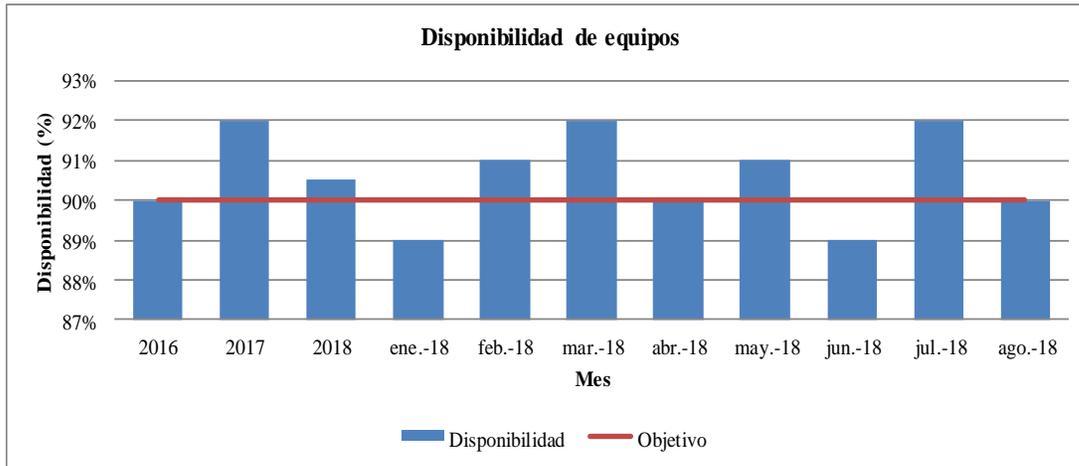


Figura 30. Disponibilidad de equipos en la mina objeto de estudio. Fuente: Organización Corona

3.4.4.2. Rendimiento de equipos

La Figura 31, muestra el comportamiento del rendimiento de los equipos, apreciándose un incumplimiento del promedio año 2018 con respecto al objetivo.

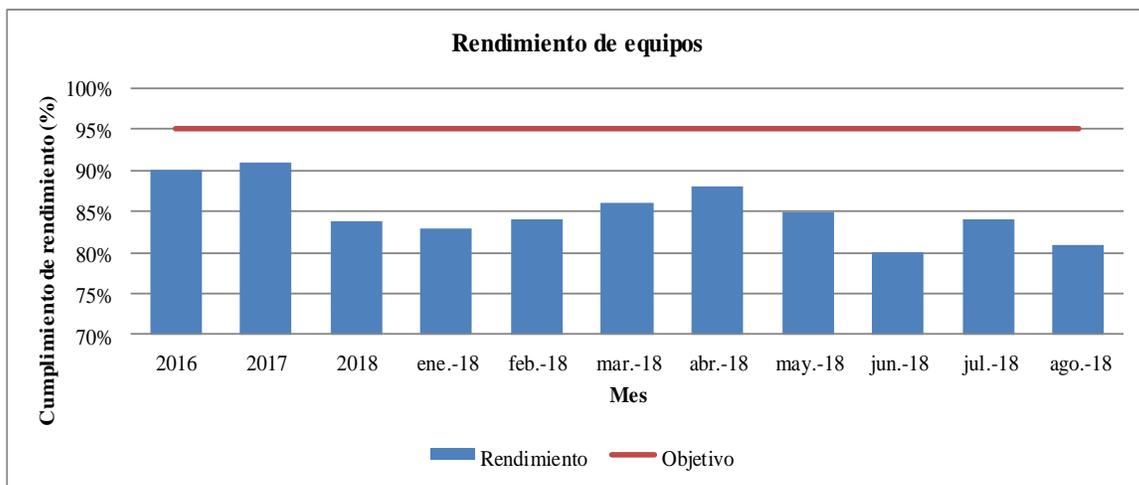


Figura 31. Rendimiento de equipos de la mina objeto de estudio. Fuente: Organización Corona

3.4.4.3. Calidad a la primera

La Figura 32 muestra el comportamiento de la calidad, apreciándose un cumplimiento en el promedio del año 2018 con respecto al objetivo.

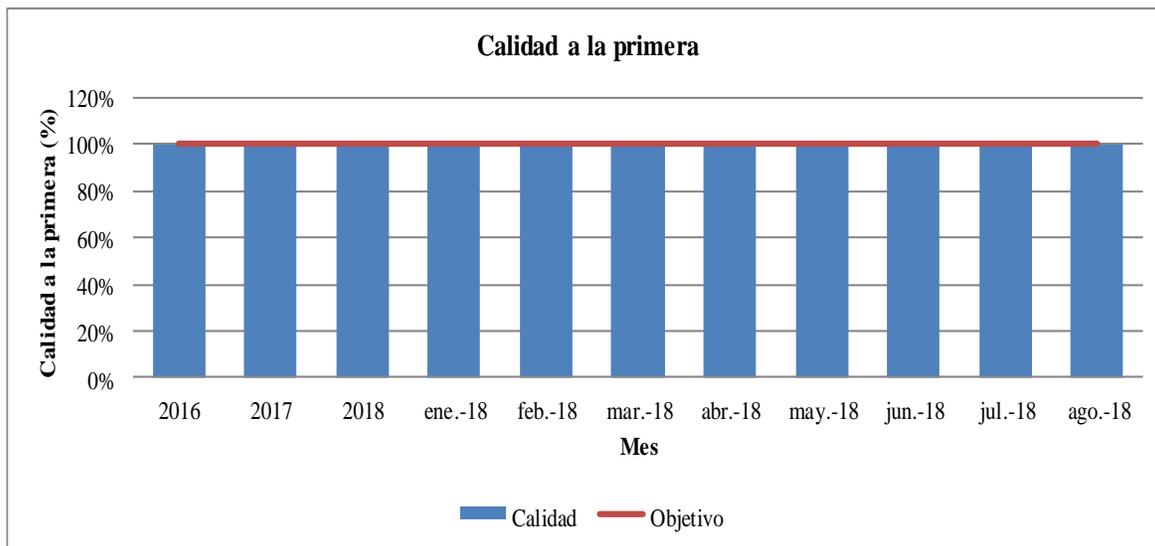


Figura 32. Calidad a la primera de la mina objeto de estudio. Fuente: Organización Corona

3.5. Resultados del diagnóstico

En la Tabla 15, se puede apreciar la descripción de los resultados del conteo de veces que cada uno de los indicadores analizados tiene éxito en alcanzar la meta de cada mes, o el caso contrario. En las Figuras 33 y 34, se pueden apreciar los gráficos que describen los resultados de los éxitos y fracasos respectivamente.

Tabla 15. Resultados del Diagnóstico. Fuente: elaboración propia.

Indicador	Cantidad de éxitos	Cantidad de fracasos	Porcentaje de éxitos	Porcentaje de fracasos
Costo de venta	3	5	37.5%	62.5%
Costo de producción y administración	2	6	25.0%	75.0%
Productividad de mano de obra	0	8	0.0%	100.0%
Productividad maquinas disponibles	0	8	0.0%	100.0%
Entregas	3	5	37.5%	62.5%
Kanban clientes	1	7	12.5%	87.5%
Nivel de Inventario mina	6	2	75.0%	25.0%
Reclamos	8	0	100.0%	0.0%
Producto no conforme	8	0	100.0%	0.0%
Eficiencia global de equipos	0	8	0.0%	100.0%
Disponibilidad de equipos	6	2	75.0%	25.0%
Rendimiento de equipos	0	8	0.0%	100.0%
Calidad a la primera	8	0	100.0%	0.0%

En la Figura 33 se muestra que el sistema de operaciones de la mina tiene fortalezas en factores como la calidad a la primera, producto no conforme y reclamos, puesto que siempre ha cumplido con las expectativas y metas planteadas. Aunque, se aprecia un nivel de cumplimiento en la disponibilidad de equipos y un aceptable nivel de inventario en la mina, esto no se ve reflejado en el cumplimiento de la productividad, las entregas y los costos operacionales.

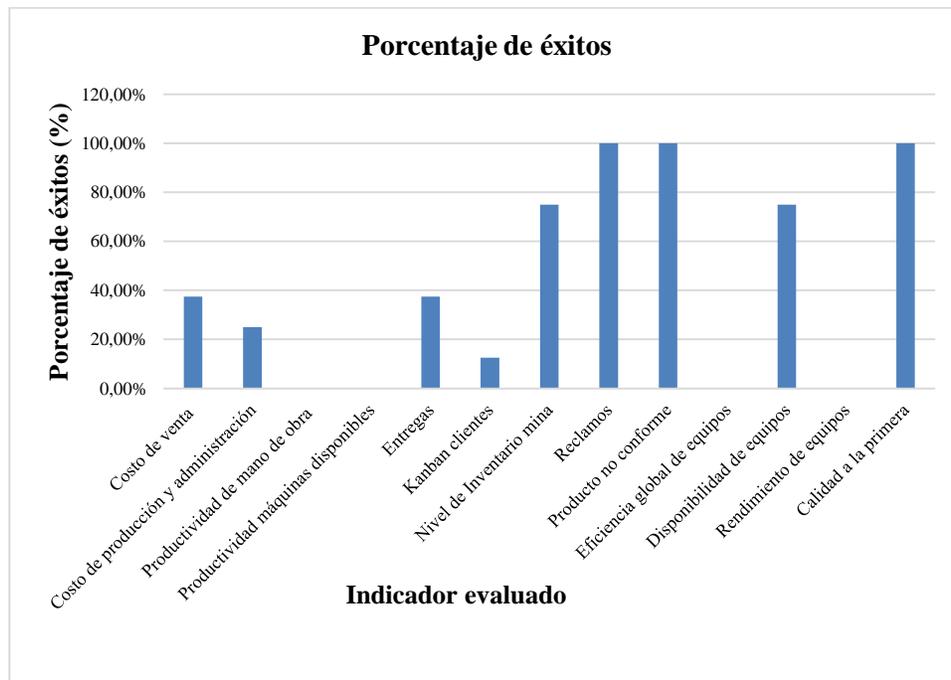


Figura 33. Porcentaje de éxitos. Fuente: Organización Corona

En la Figura 34, se verifica que hay situaciones críticas donde no se cumplen las metas de la compañía en la eficiencia global de equipos (EGE), el rendimiento de equipos, Kanban Clientes, costos de producción y administración, así como en la productividad tanto de mano de obra, como de máquinas, lo cual genera que parte de estas variables, sean oportunidades de mejora en el proceso global del sistema de operaciones.

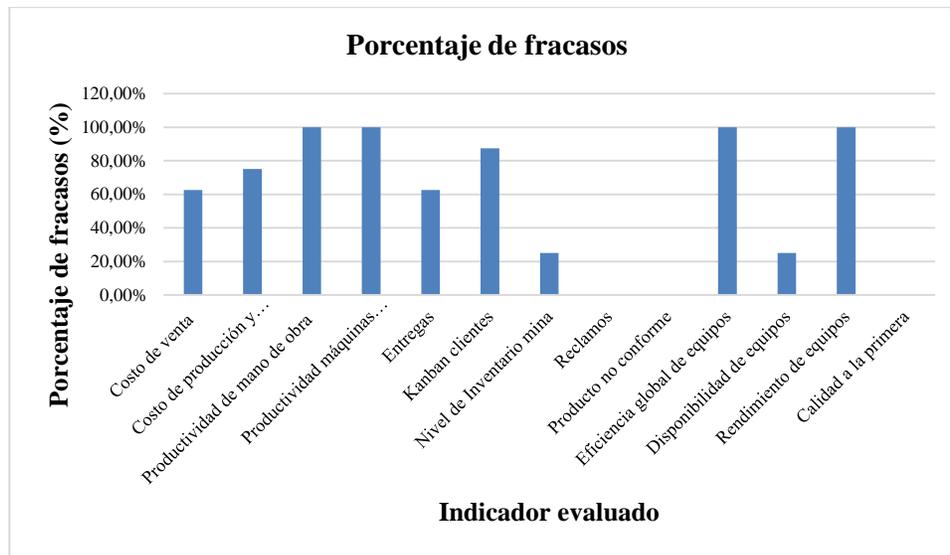


Figura 34. Porcentaje de fracasos. Fuente: Organización Corona

3.6. Conclusiones del capítulo

En este capítulo, se presenta la evaluación del sistema de operaciones frente a lo que se espera respecto de los objetivos propuestos por la metodología TPM. Las principales brechas o focos de atención se presentan a continuación:

- Costo de producción: el incumplimiento reflejado en costo de producción se debe al impacto que tiene el sobre costo, por horas adicionales de uso del equipo minero (EMS). Además, según información de la compañía, se presenta un valor por encima de algunos referentes de esta tipología de minas a nivel mundial. Esto además, se debe a la complejidad del proceso y a las actividades necesarias de explotación, mezcla y homogeneización de materiales, producto de su variabilidad natural en las propiedades especificadas con los clientes.
- Productividad: no se ha podido dar cumplimiento al indicador de productividad debido al incumplimiento en entregas (toneladas despachadas), al bajo rendimiento, y a una alta cantidad de horas de uso de EMS, para la operación.

De esta forma, se establece que la programación de operaciones debe contribuir al mejorar globalmente los indicadores analizados dentro de este método de diagnóstico. Siendo así, se busca diseñar alternativas que permitan mejorar el costo de utilización de EMS por medio de métodos para programar las actividades del proceso productivo, considerando los recursos disponibles, así como la capacidad y rendimiento asociados a los mismos.

4. Métodos de solución propuestos

Para el presente estudio, la formalización del MSRCSP empleando modelos de programación no lineal entera mixta (MINLP), busca contribuir a la comprensión y resolución del problema mediante la reducción del costo de las actividades. Para el diseño de los modelos, se tuvo en cuenta las diferentes restricciones encontradas, en el proceso de investigación. Para realizar los modelos matemáticos es necesario, en primer lugar, definir los parámetros o datos de entrada del mismo. Estos datos contienen la información y las características principales del problema, para su posterior solución.

Así, los modelos propuestos buscan minimizar el costo total de uso de los EMS, por medio de la asignación de recursos a actividades, aportando una o varias habilidades, cantidad de material que debe procesar cada recurso con determinada habilidad en cada actividad, además de establecer el momento en que inicia una actividad, así como su duración y momento de finalización. Entre los datos de entrada se considera la cantidad de recursos disponibles (*hasta un valor n*), la cantidad de actividades programadas (*hasta un valor m*) y la cantidad total de habilidades requeridas en el proyecto (*hasta un valor l*). También se considera el costo por hora de utilizar cada recurso, la relación de recursos y habilidades, el rendimiento de cada recurso para ejecutar una habilidad, cantidad demandada de material en cada actividad, tiempo estándar y tiempo efectivo por cada turno de trabajo, fecha máxima de entrega del proyecto.

Con el fin de que los modelos cumplan su propósito, se establecen supuestos como que las actividades que se programan son secuenciales, cada recurso puede trabajar en una o varias habilidades, cada recurso puede ser asignado a una o varias actividades, además es importante considerar que la duración de cada actividad no está predefinida sino que depende de la cantidad de equipos que sean asignados, para cumplir con la demanda establecida de material. De igual forma, se establece que no hay faltantes de material. También, se agrega, que para cumplir cada actividad, se requiere de al menos una habilidad. Adicionalmente, no se consideran tiempos de alistamiento entre actividades o cambio de habilidad por EMS, ni tiempos relacionados a mantenimiento de equipos.

Con estos parámetros definidos, se fija así la función objetivo y las restricciones del modelo. La función objetivo se puede resumir en: minimizar el costo asociado de fabricar los productos necesarios para suplir la demanda de los clientes, determinando las actividades propias del proceso, el tamaño de lote, y la asignación de los EMS u operadores de acuerdo a sus habilidades. A continuación se presentan los modelos empleados y su validación en detalle.

4.1. Modelo monoproducto sin asignación de operadores

Conjuntos principales

I : Recursos $\{1, 2, \dots, n\}$

J : Actividades $\{1, 2, \dots, m\}$

K : Habilidades $\{1, 2, \dots, l\}$

Parámetros

$CUR_{i,k}$ = Matriz de costo por unidad de tiempo de usar el recurso i para la habilidad k

$CRH_{i,k}$ = Matriz binaria de capacidad del recurso i para desarrollar la habilidad k

$RAH_{j,k}$ = Matriz binaria del requerimiento de cada la actividad j de la habilidad k

CAH_j = Toneladas de material a procesarse en la actividad j

$TRH_{i,k}$ = Tiempo de procesamiento por tonelada del recurso i en la habilidad k

TDR_i = Tiempo disponible de utilización del recurso i

FRG = Factor de rendimiento global por tipo de producto explotado

$FRHA_{j,k}$ = Factor de rendimiento de la actividad j cuando se realiza la habilidad k

FME = Fecha máxima de entrega del proyecto

TE = Tiempo estándar por turno de trabajo

TEE = Tiempo efectivo por turno de trabajo

Variables de decisión

$y_{i,j,k} = \begin{cases} 1: \text{El recurso } i \text{ ejecuta la actividad } j \text{ utilizando la habilidad } k \\ 0: \text{Lo contrario} \end{cases}$

$x_{i,j,k}$ = Cantidad de material que el recurso i procesa en la actividad j con la habilidad k

d_j = Duración total de la actividad j

s_j = Momento en que inicia la actividad j

f_j = Momento en que finaliza la actividad j

$h_{i,j,k}$ = Horas que el recurso i trabaja en la actividad j con la habilidad k

Función Objetivo

$$\text{Min } Z = \sum_{i,j,k} CUR_{i,k} * h_{i,j,k} \quad (1)$$

Restricciones

$$y_{i,j,k} \leq CRH_{i,k} \quad \forall i, j, k \quad (2)$$

$$\sum_i y_{i,j,k} * CRH_{i,k} \geq RAH_{j,k} \quad \forall j, k \quad (3)$$

$$\sum_i x_{i,j,k} * CRH_{i,k} = CAH_j * RAH_{j,k} \quad \forall j, k \quad (4)$$

$$\frac{x_{i,j,k} * RAH_{j,k} * CRH_{i,k}}{CAH_j} \leq y_{i,j,k} * RAH_{j,k} * CRH_{i,k} \quad \forall i, j, k \quad (5)$$

$$h_{i,j,k} = x_{i,j,k} * TRH_{i,k} * (2 - FRG) * (2 - FRHA_{j,k}) \quad \forall i, j, k \quad (6)$$

$$\sum_{j,k} h_{i,j,k} * \frac{TE}{FME} \leq TEE \quad \forall i \quad (7)$$

$$d_j = \underset{i,k}{\text{máxima}}(h_{i,j,k}) \quad \forall j \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
 s_j &= 0 & j &= 1 & (9) \\
 s_j &\geq f_{j-1} & \forall j &> 1 & (10) \\
 f_j &= s_j + d_j & \forall j & & (11) \\
 \sum_j d_j &\leq FME & \forall j & & (12) \\
 y_{i,j,k} &\in \{0,1\} & \forall i,j,k & & (13) \\
 x_{i,j,k} &\geq 0 & \forall i,j,k & & (14) \\
 h_{i,j,k} &\geq 0 & \forall i,j,k & & (15) \\
 d_j &\geq 0 & \forall j & & (16) \\
 s_j &\geq 0 & \forall j & & (17) \\
 f_j &\geq 0 & \forall j & & (18)
 \end{aligned}$$

La función objetivo que esta expresada en la ecuación 1, calcula el costo total de horas de utilización de los EMS considerando la tarifa de cada equipo para realizar determinada habilidad. En la ecuación 2 se verifica la capacidad de los recursos, para desarrollar determinadas habilidades. Por otra parte, en las ecuación 3 se asocian los requerimientos de cada actividad respecto a las habilidades necesarias para ser ejecutada. Las ecuación 4 limita la demanda en términos de la cantidad para procesar dependiendo de cada actividad. Después, en la ecuación 5 se relaciona las variables de decisión, respecto a la asignación de recursos a actividades y las cantidades que deben procesar con cada habilidad. En las ecuación 6 se calcula el tiempo que cada recurso realizó determinada habilidad en cada actividad. Además, en las ecuación 7 se establece que el tiempo de uso los recursos, está limitado por el tiempo efectivo de cada turno.

El cálculo de la duración total de cada actividad se muestra en la ecuación 8, mientras que la definición del momento de arranque de la primera actividad se restringe en la ecuación 9. En la ecuación 10 se establece el momento de inicio de las demás actividades considerando secuencialidad entre ellas. En la ecuación 11 se establece el momento en que terminan las actividades, mientras que en la restricción 12 se limita la duración total del proceso a la fecha máxima de entrega del lote. Por último, en la restricción 13 se establece que la variable de asignación es binaria y en las restricciones 14-18 se define que las variables de decisión referentes a tiempo, cantidades, así como momentos de inicio y finalización de actividades, pertenecen a los números reales.

4.2. Modelo monoproducto con asignación de operadores

Conjuntos principales

I: Recursos $\{1, 2, \dots, n\}$

J: Actividades $\{1, 2, \dots, m\}$

K: Habilidades $\{1, 2, \dots, l\}$

O: Operadores $\{1, 2, \dots, o\}$

Parámetros

$CUR_{i,k}$ = Matriz de costo por unidad de tiempo de usar el recurso i para la habilidad k

$CRH_{i,k}$ = Matriz binaria de capacidad del recurso i para desarrollar la habilidad k

$RAH_{j,k}$ = Matriz binaria del requerimiento de cada la actividad j de la habilidad k

$COR_{o,j}$ = Matriz binaria de la capacidad de un operador O para utilizar un recurso j

CAH_j = Toneladas de material a procesarse en la actividad j

$TRH_{i,k}$ = Tiempo de procesamiento por tonelada del recurso i en la habilidad k

FRG = Factor de rendimiento global por tipo de producto explotado

$FRHA_{j,k}$ = Factor de rendimiento de la actividad j cuando se realiza la habilidad k

FME = Fecha máxima de entrega del proyecto

TE = Tiempo estándar por turno de trabajo

TEE = Tiempo efectivo por turno de trabajo

VARIABLES DE DECISIÓN

$y_{o,j,i,k} = \begin{cases} 1: \text{El operador } O \text{ usa el recurso } i \text{ en la actividad } j \text{ utilizando la habilidad } k \\ 0: \text{Lo contrario} \end{cases}$

$x_{o,j,i,k}$

= Cantidad de material que procesa el operador O con el recurso i en la actividad j utilizando la habilidad k

$s_{o,j,i,k}$

= Momento en que inicia la actividad j con el operador O el recurso i y la habilidad k

$f_{o,j,i,k}$

= Momento en que finaliza la actividad j con el operador O el recurso i y la habilidad k

$ur_{i,j}$ = Horas que el recurso i trabaja en la actividad j

$sr_{i,j}$ = Momento en que el recurso i inicia la actividad j

$fr_{i,j}$ = Momento en que el recurso i finaliza la actividad j

sop_j = Momento en que se inicia la actividad j

fop_j = Momento en que se finaliza la actividad j

dop_j = Duración de la actividad j

Función Objetivo

$$\text{Min } Z = \sum_{i,j,k,o} CUR_{i,k} * h_{o,j,i,k} \quad (19)$$

Restricciones

$$\sum_{i,o} x_{o,j,i,k} * CRH_{i,k} * COR_{o,j} = CAH_j * RAH_{j,k} \quad \forall j, k \quad (20)$$

$$y_{o,j,i,k} * CRH_{i,k} * COR_{o,j} \geq \frac{x_{i,j,k} * RAH_{j,k} * CRH_{i,k}}{CAH_j} \quad \forall o, i, j, k \quad (21)$$

$$\sum_i y_{o,j,i,k} \leq 1 \quad \forall i, j, k \quad (22)$$

$$h_{o,i,j,k} = x_{o,i,j,k} * TRH_{i,k} * (2 - FRG) * (2 - FRHA_{j,k}) \quad \forall o, i, j, k \quad (23)$$

$$u_{i,j} = \sum_{o,k} h_{o,i,j,k} \quad \forall i, j \quad (24)$$

$$fr_{i,j} = sr_{i,j} + dr_{i,j} \quad \forall i, j \quad (25)$$

$$sr_{i,j} \geq fr_{i,j-1} \quad \forall i, j < 1 \quad (26)$$

$$dop_j = \max_i ur_{i,j} \quad j = 1 \quad (27)$$

$$sop_j \geq fop_{j-1} \quad \forall j > 1 \quad (28)$$

$$fop_j = sop_j + dop_j \quad \forall j \quad (29)$$

$$\sum_j dop_j \leq FME \quad \forall j \quad (30)$$

$$\sum_{i,k} s_{o,j,i,k} \geq \sum_{i,k} f_{o,j-1,i,k} \quad \forall o, j > 1 \quad (31)$$

$$\sum_{i,j,k} h_{o,j,i,k} * \frac{TE}{FME} \leq TEE \quad \forall o \quad (32)$$

$$y_{o,j,i,k} \in \{0,1\} \quad \forall o, i, j, k \quad (33)$$

$$x_{o,j,i,k} \geq 0 \quad \forall o, i, j, k \quad (34)$$

$$h_{o,j,i,k} \geq 0 \quad \forall o, i, j, k \quad (35)$$

$$s_{o,j,i,k} \geq 0 \quad \forall o, i, j, k \quad (36)$$

$$f_{o,j,i,k} \geq 0 \quad \forall o, i, j, k \quad (37)$$

$$ur_{i,j} \geq 0 \quad \forall i, j \quad (38)$$

$$sr_{i,j} \geq 0 \quad \forall i, j \quad (39)$$

$$fr_{i,j} \geq 0 \quad \forall i, j \quad (40)$$

$$sop_j \geq 0 \quad \forall j \quad (41)$$

$$dop_j \geq 0 \quad \forall j \quad (42)$$

$$fop_j \geq 0 \quad \forall j \quad (43)$$

En este modelo, se tienen en cuenta la asignación de operadores, para programación de EMS en un ambiente monoprodueto. La función objetivo, que está expresada en la ecuación 19, calcula el costo total de horas de utilización de los EMS, considerando la tarifa de cada equipo, para realizar determinada habilidad y sus operadores. En la ecuación 20, se asegura que se debe procesar determinada cantidad demandada del material, considerando las habilidades del operador para manejar un EMS y la capacidad del EMS para realizar una actividad. La ecuación 21 garantiza la asignación en la variable binaria de los equipos, operadores, habilidades y actividades, mientras la ecuación 22 permite que se ejecute como máximo una habilidad por actividad. En la ecuación 23 se calculan el número de horas consumidas por los operadores en tiempo de ejecución de actividades, mientras la ecuación 24 mide la utilización de EMS.

La ecuación 25, establece la finalización de cada actividad por cada equipo y la ecuación 26, determina el momento de inicio; por otra parte, la ecuación 27 determina la duración total de la actividad. La ecuación 28, establece la precedencia de actividades, mientras la ecuación 29, abarca

toda la duración global de la actividad abarcando todos los equipos utilizados. La ecuación 30, restringe que las actividades deben terminarse antes del tiempo de entrega permitido. Por otra parte, la ecuación 31, considera el uso de cada equipo y que estos deben utilizarse en momentos diferentes, restringidos por la precedencia de actividades. La ecuación 32, calcula y limita el uso de los equipos de acuerdo con la restricción de horas efectivas por turno. Por último, en la restricción 33, se establece que la variable de asignación es binaria y en las restricciones 34-43 se define que las variables de decisión referentes a tiempo, cantidades, así como momentos de inicio y finalización de actividades, pertenecen a los números reales.

4.3. Modelo multiproducto sin asignación de operadores

Conjuntos principales

I: Recursos $\{1, 2, \dots, n\}$

J: Actividades $\{1, 2, \dots, m\}$

K: Habilidades $\{1, 2, \dots, l\}$

P: Productos $\{1, 2, \dots, p\}$

Parámetros

$CUR_{i,k}$ = Matriz de costo por unidad de tiempo de usar el recurso *i* para la habilidad *k*

$CRH_{i,k}$ = Matriz binaria de capacidad del recurso *i* para desarrollar la habilidad *k*

$RAH_{j,k}$ = Matriz binaria del requerimiento de cada la actividad *j* de la habilidad *k*

$CAH_{p,j}$ = Toneladas de material a procesarse en la actividad *j*

$TRH_{i,k}$ = Tiempo de procesamiento por tonelada del recurso *i* en la habilidad *k*

FRG_j = Factor de rendimiento global por tipo de producto *p* explotado

$FRHA_{j,k}$ = Factor de rendimiento de la actividad *j* cuando se realiza la habilidad *k*

FME_p = Fecha máxima de entrega del proyecto

TE = Tiempo estándar por turno de trabajo

TEE = Tiempo efectivo por turno de trabajo

Variables de decisión

$y_{j,i,k,p} = \begin{cases} 1: \text{El recurso } i \text{ realiza la actividad } j \text{ del producto } p \text{ utilizando la habilidad } k \\ 0: \text{Lo contrario} \end{cases}$

$x_{j,i,k,p}$ = Cantidad de material extraída por el recurso *i* en la actividad *j* del producto *p* con la habilidad *k*

$h_{j,i,k,p}$ = Horas de trabajo del recurso *i* en la actividad *j* con la habilidad *k* en el producto *p*

$a_{i,j,p}$ = Momento en que el recurso *i* inicia la actividad *j* en el producto *p*

$t_{i,j,p}$ = Momento en que el recurso *i* finaliza la actividad *j* en el producto *p*

$s_{j,p}$ = Momento en que inicia la actividad *j* del producto *p*

$f_{j,p}$ = Momento en que finaliza la actividad *j* del producto *p*

$d_{j,p}$ = Duración de la actividad j en el producto p

Función Objetivo

$$\text{Min } Z = \sum_{i,j,k,p} \text{CUR}_{i,k} * h_{j,i,k,p} \quad (44)$$

Restricciones

$$\sum_i x_{j,i,k,p} * \text{CRH}_{i,k} = \text{RAH}_{j,k} * \text{CAH}_{j,p} \quad \forall j, k, p \quad (45)$$

$$\frac{x_{j,i,k,p} * \text{RAH}_{j,k} * \text{CRH}_{i,k}}{\text{CRH}_{i,k}} \leq y_{j,i,k,p} \quad \forall i, j, k, p \quad (46)$$

$$\sum_i y_{j,i,k,p} \leq 1 \quad \forall j, k, p \quad (47)$$

$$\frac{\sum_{j,k,p} h_{j,i,k,p} * \text{TE}}{\text{maxima}_p(\text{FME}_p)} \leq \text{TEE} \quad \forall i \quad (48)$$

$$h_{i,j,k,p} = x_{i,j,k,p} * \text{TRH}_{i,k} * (2 - \text{FRG}) * (2 - \text{FRHA}_{j,k}) \quad \forall i, j, k, p \quad (49)$$

$$d_{j,p} = \sum_{i,k} h_{j,i,k,p} \quad \forall j, p \quad (50)$$

$$s_{j,p} \geq f_{j-1,p} \quad \forall j > 1, p \quad (51)$$

$$s_{j,p} \geq f_{j,p-1} \quad \forall j, p > 1 \quad (52)$$

$$f_{j,p} = s_{j,p} + d_{j,p} \quad \forall j, p \quad (53)$$

$$\sum_j d_{j,p} \leq \text{FME}_p \quad \forall p \quad (54)$$

$$t_{i,j,p} = a_{i,j,p} + \sum_k h_{i,j,k,p} \quad \forall i, j, p \quad (55)$$

$$a_{i,j,p} \geq t_{i,j-1,p} \quad \forall i, j > 1, p \quad (56)$$

$$a_{i,j,p} \geq t_{i,j,p-1} \quad \forall i, j, p > 1 \quad (57)$$

$$y_{j,i,k,p} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k, p \quad (58)$$

$$x_{j,i,k,p} \geq 0 \quad \forall i, j, k, p \quad (59)$$

$$h_{j,i,k,p} \geq 0 \quad \forall i, j, k, p \quad (60)$$

$$s_{j,p} \geq 0 \quad \forall j, p \quad (61)$$

$$f_{j,p} \geq 0 \quad \forall j, p \quad (62)$$

$$d_{j,p} \geq 0 \quad \forall j, p \quad (63)$$

$$a_{i,j,p} \geq 0 \quad \forall i, j, p \quad (64)$$

$$t_{i,j,p} \geq 0 \quad \forall i, j, p \quad (65)$$

En este modelo se programan actividades y asignación de equipos, para ambientes con múltiples productos sin asignación de operadores. La función objetivo que esta expresada en la ecuación 44, calcula el costo total de horas de utilización de los EMS considerando la tarifa de cada equipo. En la ecuación 45, se asegura que se debe procesar determinada cantidad demandada del material,

considerando la capacidad del EMS para realizar una actividad en diferentes productos. La ecuación 46, relaciona las variables binarias de asignación de los equipos, habilidades y actividades con las variables reales de cantidades a procesar, mientras la ecuación 47, limita a que se ejecuta como máximo una habilidad por actividad.

La ecuación 48, calcula y limita el uso de los equipos de acuerdo con la restricción de horas efectivas por turno. La ecuación 49, calcula el número de horas consumidas en tiempo de ejecución de actividades. En la ecuación 50, se calcula la duración de todo el proceso, mientras en las ecuaciones 51 y 52, se establece la precedencia entre actividades, considerando la secuencia estándar y los productos a extraer. En las restricción 53, se define la terminación de las actividades y en las ecuación 54, se limita la fecha de entrega de cada producto. Por otra parte, en las ecuación 55, se calcula la duración de cada actividad con cada equipo en cada producto mientras las ecuaciones 56 y 57 establecen la precedencia de actividades. Por último, en la restricción 58, se establece que la variable de asignación es binaria y en las restricciones 59-65, se define que las variables de decisión referentes a tiempo, cantidades, así como momentos de inicio y finalización de actividades, pertenecen a los números reales.

4.4. Modelo multiproducto con asignación de operadores

Conjuntos principales

I: Recursos $\{1, 2, \dots, n\}$

J: Actividades $\{1, 2, \dots, m\}$

K: Habilidades $\{1, 2, \dots, l\}$

P: Productos $\{1, 2, \dots, p\}$

O: Operadores $\{1, 2, \dots, o\}$

Parámetros

$CUR_{i,k}$ = Matriz de costo por unidad de tiempo de usar el recurso *i* para la habilidad *k*

$CRH_{i,k}$ = Matriz binaria de capacidad del recurso *i* para desarrollar la habilidad *k*

$RAH_{j,k}$ = Matriz binaria del requerimiento de cada la actividad *j* de la habilidad *k*

$CAH_{p,j}$ = Toneladas de material a procesarse en la actividad *j*

$TRH_{i,k}$ = Tiempo de procesamiento por tonelada del recurso *i* en la habilidad *k*

FRG_j = Factor de rendimiento global por tipo de producto *p* explotado

$FRHA_{j,k}$ = Factor de rendimiento de la actividad *j* cuando se realiza la habilidad *k*

$COR_{o,i}$ = Factor de rendimiento de la actividad *j* cuando se realiza la habilidad *k*

FME_p = Fecha máxima de entrega del proyecto

TE = Tiempo estándar por turno de trabajo

TEE = Tiempo efectivo por turno de trabajo

Variables de decisión

$y_{o,j,i,k,p}$
 = {1: El operador i usa el recurso i en la actividad j del producto p utilizando la habilidad k
 0: Lo contrario

$x_{o,j,i,k,p}$
 = Cantidad de material extraída por operador o con el recurso i en la actividad j del producto p con la habilidad k

$h_{o,j,i,k,p}$ = Horas de trabajo del operador o en el recurso i en la actividad j con la habilidad k en el producto p

$s_{o,j,i,k,p}$ = Horas inicial de trabajo del operador o en el recurso i en la actividad j con la habilidad k en el producto p

$f_{o,j,i,k,p}$ = Hora final de trabajo del operador o en el recurso i en la actividad j con la habilidad k en el producto p

$ur_{i,j,p}$ = Tiempo de uso del recurso i en la actividad j del producto p

$fr_{i,j,p}$ = Momento en que el recurso i finaliza la actividad j en el producto p

$sr_{i,j,p}$ = Momento en que el recurso i inicia la actividad j del producto p

$sop_{j,p}$ = Momento en que inicia la actividad j del producto p

$fop_{j,p}$ = Momento en que finaliza la actividad j del producto p

$dop_{j,p}$ = Duración de la actividad j en el producto p

Función Objetivo

$$\text{Min } Z = \sum_{o,i,j,k,p} CUR_{i,k} * h_{o,j,i,k,p} \quad (66)$$

Restricciones

$$\sum_{i,o} x_{o,j,i,k,p} * CRH_{i,k} * COR_{o,i} = RAH_{j,k} * CAH_{j,p} \quad \forall j, k, p \quad (67)$$

$$y_{o,j,i,k,p} \leq CRH_{i,k} * COR_{o,i} \quad \forall i, j, k, p, o \quad (68)$$

$$\sum_{i,o} y_{o,j,i,k,p} * RAH_{j,k} \leq 1 \quad \forall j, k, p \quad (69)$$

$$\frac{x_{o,j,i,k,p}}{CRH_{i,k}} \leq y_{o,j,i,k,p} * CRH_{i,k} * COR_{o,i} \quad \forall i, j, k, p, o \quad (70)$$

$$\frac{\sum_o x_{o,j,i,k,p} * CRH_{i,k} * COR_{o,i} * RAH_{j,k}}{CAH_{j,p}} \leq \sum_o y_{o,j,i,k,p} * CRH_{i,k} * RAH_{j,k} \quad \forall i, j, k, p \quad (71)$$

$$h_{o,j,i,k,p} = x_{o,j,i,k,p} * TRH_{i,k} * (2 - FRG) * (2 - FRHA_{j,k}) \quad \forall o \quad (72)$$

$$\frac{\sum_{i,j,k,p} h_{o,j,i,k,p} * TE}{\text{maxima}_p(FME_p)} \leq TEE \quad \forall i, j, k, p, o \quad (73)$$

$$\sum_{i,k} f_{o,j,i,k,p} = \sum_{i,k} s_{o,j,i,k,p} + \sum_{i,k} h_{o,j,i,k,p} \quad \forall j, p, o \quad (74)$$

$$\sum_{i,k} s_{o,j,i,k,p} \geq \sum_{i,k} f_{o,j-1,i,k,p} \quad \forall j > 1, p, o \quad (75)$$

$$fr_{i,j,p} = sr_{i,j,p} + ur_{i,j,p} \quad \forall i, j, p \quad (76)$$

$$sr_{i,j,p} \geq f_{i,j-1,p} \quad \forall i, j > 1, p \quad (77)$$

$$dop_{j,p} = \max_i(ur_{i,j,p}) \quad \forall j, p \quad (78)$$

$$fop_{j,p} = sop_{j,p} + dop_{j,p} \quad \forall j, p \quad (79)$$

$$sop_{j,p} \geq fop_{j-1,p} \quad \forall i, j > 1, p \quad (80)$$

$$\sum_j dop_{j,p} \leq FME_p \quad \forall p \quad (81)$$

$$y_{o,j,i,k,p} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k, p \quad (82)$$

$$x_{o,j,i,k,p} \geq 0 \quad \forall i, j, k, p \quad (83)$$

$$h_{o,j,i,k,p} \geq 0 \quad \forall i, j, k, p \quad (84)$$

$$sop_{j,p} \geq 0 \quad \forall j, p \quad (85)$$

$$fop_{j,p} \geq 0 \quad \forall j, p \quad (86)$$

$$dop_{j,p} \geq 0 \quad \forall j, p \quad (87)$$

$$fr_{i,j,p} \geq 0 \quad \forall i, j, p \quad (88)$$

$$sr_{i,j,p} \geq 0 \quad \forall i, j, p \quad (89)$$

$$ur_{i,j,p} \geq 0 \quad \forall i, j, p \quad (90)$$

En este modelo, se programan actividades y asignación de equipos para ambientes con múltiples productos considerando la asignación de operadores a los EMS. La función objetivo que esta expresada en la ecuación 66, calcula el costo total de horas de utilización de los EMS considerando la tarifa de cada equipo y operador. En la ecuación 67, se asegura que se debe procesar determinada cantidad demandada de cada producto, considerando las habilidades del operador para manejar un EMS y la capacidad del EMS para realizar una actividad en diferentes productos. La ecuación 68, relaciona las habilidades del operador y las capacidades del EMS, mientras la ecuación 69, permite que se ejecute como máximo una habilidad por actividad. Las ecuaciones 70 y 71, limitan la asignación considerando las habilidades del operador y la capacidad del equipo en la variable binaria de los equipos, habilidades, operadores y actividades.

La ecuación 72, calcula el número de horas consumidas por los operadores en tiempo de ejecución de actividades. Por otra parte, la ecuación 73, calcula y limita las horas de los operadores de acuerdo con la restricción de horas efectivas por turno. Las ecuaciones 74-80, definen la secuencialidad, precedencia, inicio y terminación de actividades de acuerdo con los equipos, operadores y EMS, mientras que la ecuación 81 establece la fecha final de terminación permitida para los procesos de los productos a extraer. Por último, en la restricción 82, se establece que la variable de asignación es binaria y en las restricciones 83-90 se define que las variables de decisión referentes a tiempo, cantidades, así como momentos de inicio y finalización de actividades, pertenecen a los números reales.

5. Diseño experimental y resultados

En esta sección se propone realizar un diseño experimental que permita analizar el comportamiento de los modelos de solución propuestos en diferentes ambientes, con múltiples operadores y múltiples productos. Este análisis busca establecer parámetros de rendimiento computacional y de calidad de las soluciones generadas por los modelos matemáticos y compararlos con el modelo actual de programación de operaciones mineras.

5.1. Descripción del diseño experimental

En este proyecto se diseña un experimento que consta de 4 factores: método de solución, escenario, referencia de producto, tamaño de lote y humedad. Se evalúan los métodos propuestos basados en modelos matemáticos y el método actual de programación. Por otra parte, el factor escenarios considera eliminar y agregar la asignación de operadores. El factor referencia de producto considera 3 niveles correspondientes a las referencias descritas que requieren ser explotadas en la mina objeto de estudio, las cuales se nombran producto 1, 2 y 3, respectivamente.

Por otra parte, el factor demanda se concentra en el tamaño de lote requerido por el cliente dependiendo del producto, se establecen 3 niveles correspondientes a un lote grande, mediano y pequeño. Además, se usa como factor, la humedad que tiene como niveles alto, medio y bajo. Las variables de control del experimento son el costo total de uso de los EMS y el tiempo computacional. En la Tabla 16 se describen los factores y niveles de este experimento.

Tabla 16. Diseño experimental. Fuente: elaboración propia

Factor	Descripción	Niveles	Descripción
Método de solución	Alternativa utilizada para resolver la instancia	1	Modelo matemático
		2	Escenario Actual
Escenario	Considera la necesidad de asignar o no, a los operadores	1	Sin asignación de operadores
		2	Con asignación de operadores
Referencia de producto	Producto a extraer de la superficie	1	Producto 1
		2	Producto 2
		3	Producto 3
Tamaño de lote	Cantidades demandadas de acuerdo con los pedidos del cliente	Grande	Para producto 1: 60.000; Producto 2: 30.000; Producto 3: 20.000
		Mediano	Para producto 1: 50.000; Producto 2: 25.000; Producto 3: 15.000
		Pequeño	Para producto 1: 40.000; Producto 2: 20.000; Producto 3: 10.000
Humedad	Contenido de agua presente en los productos	Alta	14%
		Media	12%
		Baja	10%

Los experimentos desarrollados para validar el modelo de programación matemática propuesto fueron desarrollados empleando IBM CPLEX STUDIO 12.8 y las pruebas fueron realizadas en un

computador con procesador Intel® Core i5 y 8GB de memoria RAM. El desarrollo del modelo se llevó a cabo en los cuatro escenarios propuestos.

5.2. Instancias y pruebas

Se construyen instancias a partir de datos reales de la empresa, las cuales van en función de los tamaños de lote, datos de humedad y productos. Después, se corren las instancias correspondientes a cada una de las combinaciones del experimento, en los modelos matemáticos desarrollados, ya sea monoproducción o multiproducción con asignación de operadores o sin dicha asignación. Se establece que el tamaño de lote grande debe ser para producto 1 de 60.000 toneladas; para el producto 2 de 30.000 toneladas; para el producto 3 de 20.000 toneladas. Mientras que los lotes medianos corresponden a 50.000, 25.000 y 15.000 toneladas por cada tipo de producto respectivamente; y, para los lotes pequeños 40.000, 20.000 y 10.000 toneladas en la misma secuencia de productos. Por otra parte, los datos históricos establecen que la humedad se considera alta cuando se encuentra al 14%, media cuando está al 12% y baja cuando es del 10%. Estas mismas instancias son ejecutadas en la empresa, con el modelo actual, por parte del personal encargado de la programación de los EMS, y servirán de base para los comparativos contra el modelo matemático propuesto.

5.3. Análisis de Resultados

Para el análisis de resultados, se utiliza la prueba de Kruskal Wallis, la cual, es una prueba no paramétrica, que se usa cuando se quiere comparar poblaciones cuyas distribuciones no son normales y análoga a la prueba paramétrica ANOVA (Soto, 2013). En este caso particular, se usa para evaluar qué factores inciden sobre la calidad de la solución.

Adicionalmente para visualizar gráficamente las variables que inciden en el rendimiento de la solución computacional de los modelos propuestos, se utilizan los diagramas de Caja-Bigotes, los cuales buscan identificar en una misma figura, valores centrales, estadígrafos, valores atípicos y valores extremos de una variable. (Valencia y Araujo, 2008).

5.3.1. Escenario monoproducción

En la Figura 35, se muestra el resumen de la prueba, que indica que se debe rechazar las hipótesis de similitud entre las medias, lo cual sugiere que estadísticamente los escenarios no son iguales.

Analizando entonces las variables que impactan dentro del rendimiento de la toma de decisiones, se establece que el tipo de producto produce mayor incidencia dentro del proceso. En la Figura 36 se puede observar, que especialmente en el nivel correspondiente al producto 2 hay una diferencia significativa en el intervalo de confianza del modelo matemático propuesto, frente al modelo actual del equipo que programa las operaciones. También se aprecia que en el caso del producto 3 se garantizan resultados más confiables utilizando el modelo matemático, puesto que el ancho del intervalo de confianza es más ajustado que el correspondiente al modelo actual. Se puede apreciar que el producto 3 tiene el menor costo de utilización de EMS, seguido por el producto 2 y 1, respectivamente. Es importante resaltar que la variable que más influye en el costo, es el tipo de

producto, puesto que después de realizar pruebas con las demás variables no se obtienen diferencias significativas en ninguno de los escenarios analizados.

Resumen de contrastes de hipótesis

Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1 La distribución de z es la misma entre las categorías de producto	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	.000	Rechaza la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es .05

Resumen de contrastes de hipótesis

Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1 La distribución de z es la misma entre las categorías de tamaño_lote.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	.000	Rechaza la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es .05

Figura 35. Prueba Kruskal Wallis para escenarios monoproducción. Fuente: Elaboración propia.

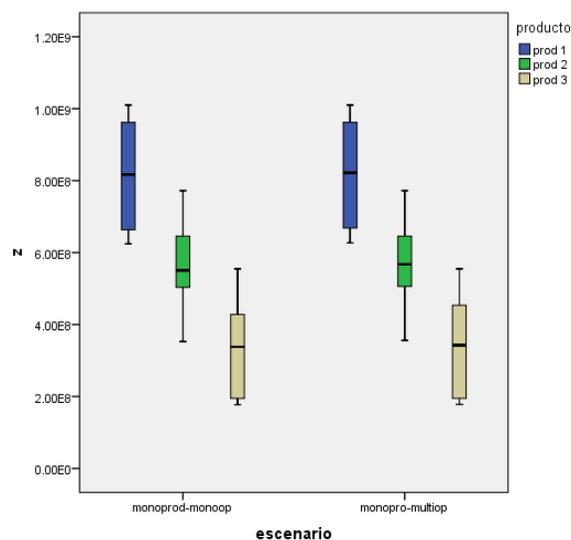


Figura 36. Diagrama de cajas y bigotes de función objetivo y tipo de producto para escenarios monoproducción. Fuente: Elaboración propia.

Respecto al tamaño de lote, en la Figura 37, se puede apreciar que cuando se elaboran lotes grandes de cualquier tipo de producto, el intervalo de confianza tiende a tener un límite superior a los demás, lo cual evidencia un mayor costo de explotación. Los menores costos se pueden apreciar en el lote pequeño, seguido por el lote intermedio.

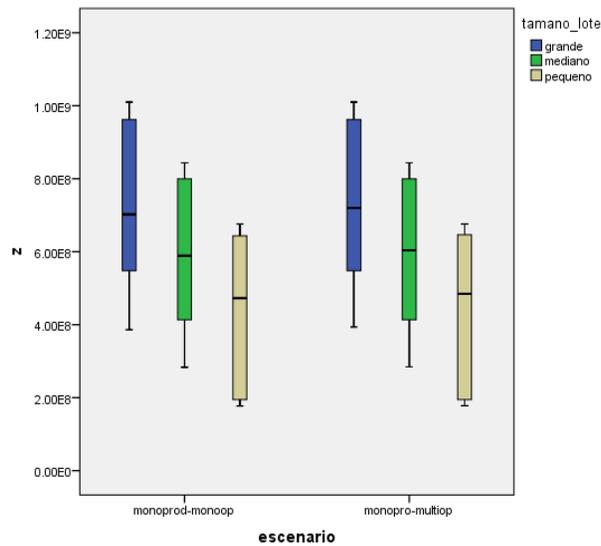


Figura 37. Diagrama de cajas y bigotes de función y tamaño de lote objetivo para escenarios monoproducto.
 Fuente: Elaboración propia.

Vale la pena destacar, que el tiempo computacional del modelo propuesto en cualquiera de los escenarios, es menor cuando se utiliza el modelo matemático, tanto para un escenario con asignación de operadores como para un escenario sin dicha asignación. En la Figura 38 se pueden observar los intervalos de confianza de dichos escenarios. Se destaca que al agregar la decisión de asignación de operadores dentro del modelo, el sistema actual de programación sufre un impacto relevante y tarda más tiempo en obtener una solución de menor calidad que la solución del modelo propuesto.

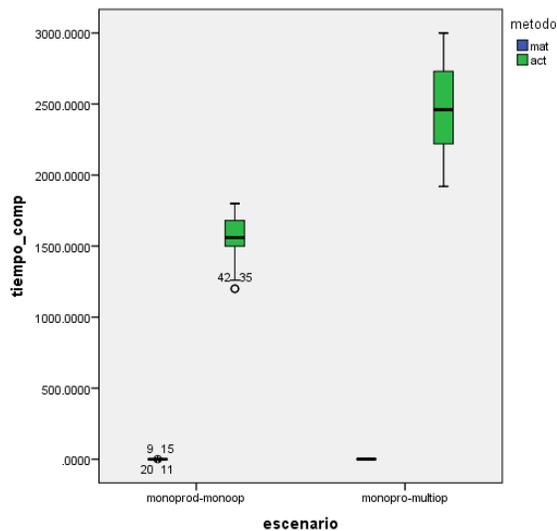


Figura 38. Diagrama de cajas y bigotes de tiempo computacional y método para escenarios monoproducto.
 Fuente: Elaboración propia.

5.3.2. Escenario multiproducto

Dentro de los escenarios multiproducto, después de realizar un análisis en las variables y su impacto en los resultados de costos de uso de EMS, se obtiene que el tamaño de los lotes de cada uno de los productos son las más influyentes. En la Figura 39 se muestran los resultados de la prueba estadística Kruskal Wallis para comparar las medias, en los cuales se rechaza la hipótesis de igualdad de medias.

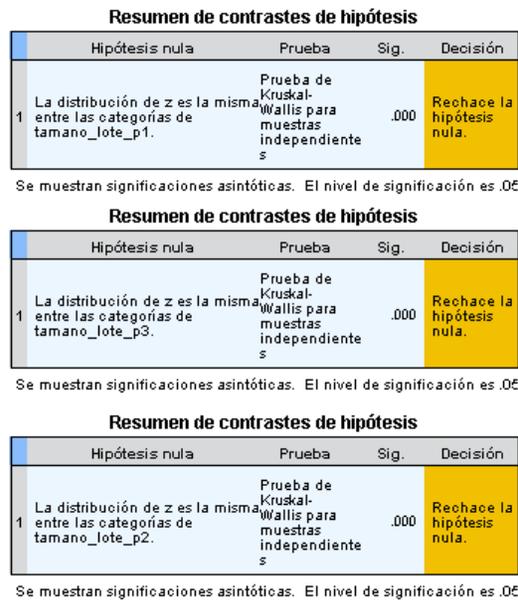


Figura 39. Prueba Kruskal Wallis para escenarios multiproducto. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con el análisis estadístico, se constata que se obtiene que el tipo de producto y el tamaño de lote son las variables relevantes en la calidad de la solución del modelo. En la Figura 40, se muestran los intervalos de confianza en el escenario multiproducto con asignación de operadores y el escenario multiproducto sin asignación de operadores. Como se puede apreciar, el intervalo de confianza favorece los costos de utilización de EMS en el caso del modelo matemático.

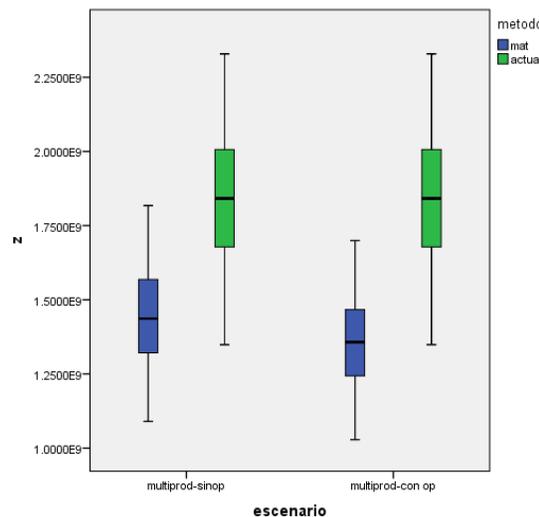


Figura 40. Diagrama de cajas y bigotes de función objetivo y tipo de producto para escenarios multiproducto.
 Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 41, se puede apreciar que a medida que se incrementa el tamaño del lote, se incrementa el costo de utilización de EMS, tanto para el escenario con asignación de operadores, como para el que no los asigna.

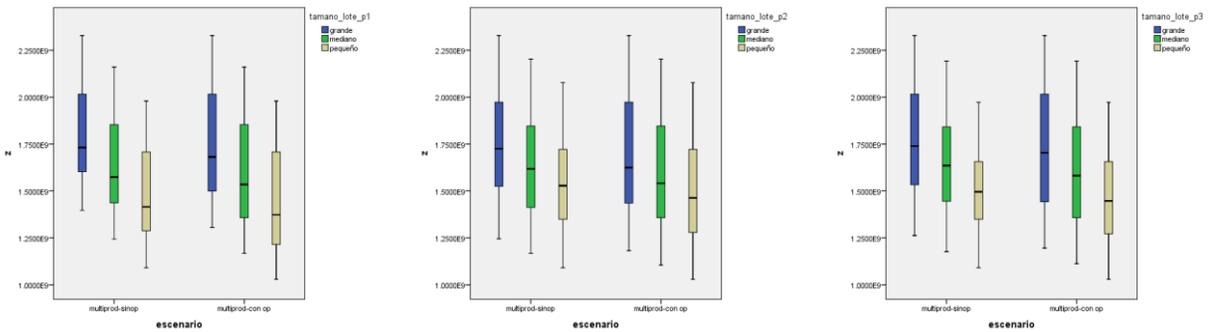


Figura 41. Diagramas de cajas y bigotes de función y tamaño de lotes de cada producto objetivo para escenarios multiproducto. Fuente: Elaboración propia.

Por último, en cuanto al tiempo computacional, en la Figura 42, se observa que este es menor cuando se usa el modelo matemático, mientras que al usar el método actual de asignación se obtienen resultados más altos, lo cual indica más tiempo para obtener una decisión de menor calidad, esto aplica al escenario multiproducto con asignación de operadores como para el que no asigna operadores.

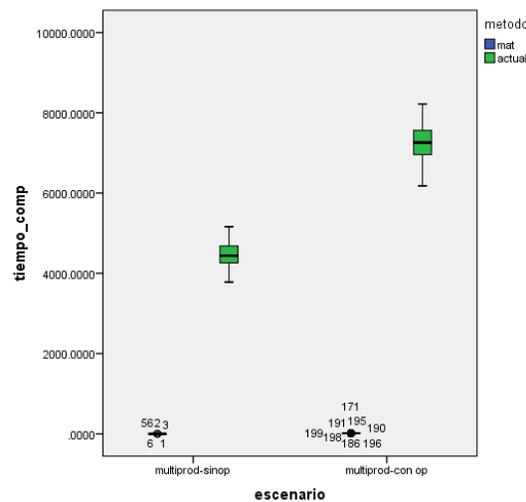


Figura 42. Diagrama de cajas y bigotes de tiempo computacional y método para escenarios multiproducto.
 Fuente: Elaboración propia.

5.3.3. Ahorros obtenidos

La Tabla 17, resume los ahorros obtenidos en los cuatro escenarios planteados, donde se aprecian cifras muy importantes para los intereses económicos de la organización, siendo el modelo de programación propuesto, una alternativa viable para el planteamiento de futuras iniciativas de

ahorros en costos y gastos en las operaciones mineras. El detalle de los resultados obtenidos se puede apreciar en los anexos 1 al 4.

Tabla 17. Ahorros obtenidos por instancia en los distintos escenarios. Fuente: elaboración propia.

Ahorros obtenidos	Monoproducto sin operador	Monoproducto con operador	Multiproducto sin operador	Multiproducto con operador
Ahorro mínimo por instancia	\$11,104,275	\$7,370,070	\$237,839,640	\$312,560,802
Ahorro promedio por instancia	\$78,917,765	\$67,112,572	\$395,071,007	\$483,129,409
Ahorro máximo por instancia	\$217,327,791	\$212,872,542	\$558,308,616	\$666,310,652

El ahorro se obtiene a partir de la diferencia entre los resultados de cada instancia con el método actual y los métodos propuestos. Estos métodos propuestos plantean los mismos escenarios del método actual. Se observa que en un escenario monoproducto sin asignación de operador, se obtienen al menos \$11.104.275 de beneficio, sin embargo esto puede ir más allá, puesto que en instancias más complejas se logra un ahorro que supera los 200 millones y en promedio se esperan \$78.917.765 de ahorro. En cuanto al escenario monoproducto con operador el ahorro mínimo supera los 7 millones de pesos; adicionalmente, se espera un ahorro promedio de \$67.112.572 y un ahorro máximo de \$212.872.542.

Además, se obtiene que en el caso de los escenarios multiproducto, el ahorro generado con los métodos propuestos es más significativo. Es necesario considerar que este tipo de escenarios son los más probables en la organización y se deben programar una mezcla de productos con diferentes operadores especializados en la operación de los EMS y equipos. En estos escenarios se puede observar que el ahorro mínimo, para el caso que tiene asignación de operadores, es de \$312.560.802, mientras que cuando no se asignan los operadores, es de poco más de 237 millones de pesos. De esta forma, se espera un ahorro promedio de \$483.129.409, en el caso de la asignación de operadores, y \$395.071.007 cuando no se hace dicha asignación. Se destaca que el ahorro máximo esperado es de \$558.308.616 para el escenario sin asignación de operadores y de \$666.310.652 cuando se realiza la asignación de personal a los EMS.

5.3.4. Tiempos computacionales

La Tabla 18, resume los ahorros en tiempos computacionales obtenidos en los cuatro escenarios planteados, donde se aprecian cifras muy importantes en los tiempos programación de la organización, siendo el modelo de programación de propuesto una alternativa viable para el planteamiento de futuras iniciativas de ahorros en tiempo de programación de las operaciones mineras, lo cual ayuda al aumento de la productividad de las operaciones. El detalle de los resultados obtenidos se puede apreciar en los anexos 1 al 4.

Tabla 18. Diferencia en tiempos computacionales en los distintos escenarios. Fuente: elaboración propia.

Tiempos de cómputo	Monoproducto sin operador	Monoproducto con operador	Multiproducto sin operador	Multiproducto con operador
Diferencia mínima por instancia (seg)	1.199,67	1.919,23	3.778,81	6.166,90
Diferencia promedio por instancia (seg)	1.550,35	2.463,52	4.478,74	7.203,62

Diferencia máxima por instancia (seg)	1.799,28	2.998,66	5.158,04	8.193,85
---------------------------------------	----------	----------	----------	----------

El ahorro en tiempos de cómputo, se obtiene a partir de la diferencia entre los resultados de cada instancia con el método actual y los métodos propuestos. Se observa que en un escenario monoproducto sin asignación de operador se obtienen al menos 1199,7 segundos de ahorro en tiempo, un promedio de 1550,5 segundos y un máximo de 1799,3 segundos. En cuanto al escenario monoproducto con operador, el ahorro mínimo en tiempo es de 1919,2 segundos, mientras que el promedio de 2463,5 segundos y el máximo es de 2998,7 segundos.

Para los escenarios multiproducto, el ahorro en tiempo es más significativo, y considerando como ya se indicó, que son los escenarios más probables en la organización, se puede observar que el ahorro mínimo para el caso que tiene asignación de operadores es de 6166,9 segundos, mientras que cuando no se asignan los operadores es de 3778,8 segundos. Adicionalmente, se espera un ahorro promedio de 7203,6 segundos en el caso de la asignación de operadores y 4478,7 segundos cuando no se hace dicha asignación. Por último el ahorro máximo esperado en tiempo de cómputo es de 8193,9 segundos para el escenario con asignación de operadores y de 5158,0 segundos sin asignación de personal a los EMS.

5.4. Conclusiones del capítulo

Se analiza el comportamiento de los modelos matemáticos desarrollados para evaluar los escenarios con programación de operaciones para un solo producto y varios, así como la consideración de asignación de personal o la ausencia de esta decisión. Es importante resaltar la capacidad de los modelos propuestos para generar ahorros significativos en la empresa, que en el caso del escenario más probable, que tienen múltiples productos y asignación de operarios, supera los 312 millones de pesos y llega a poco más de 666 millones, con un promedio de aproximadamente 483 millones de pesos. Siendo así, se demuestra la complejidad operacional que afecta los costos dentro de la empresa, y se plantean nuevas alternativas que pueden generar un impacto relevante en las finanzas corporativas, a partir del rendimiento operacional de las decisiones de programación de operaciones. También, se destaca la eficiencia computacional de los modelos, y su significativo ahorro en tiempos de programación, con respecto a la situación actual, permitiendo una toma de decisiones más ágil y una garantía de obtener el menor costo operativo posible en cada instancia.

En conclusión en este experimento, se consideran las actividades de fabricación de productos, EMS, operadores disponibles, productos a fabricar, condiciones de humedad y niveles de demanda. Los resultados obtenidos muestran que en términos de desempeño computacional y calidad de las soluciones, los modelos propuestos alcanzan mejores resultados logrando tiempos de cálculo muy cortos, que van desde 0,14 segundos en el escenario de menor complejidad, hasta 14,22 segundos en el escenario de mayor complejidad. De esta forma, se espera que con la implementación de los modelos propuestos, se puedan obtener mejores resultados para los costos operacionales, productividad y cumplimiento de entregas.

6. Conclusiones

En este proyecto, se analiza un caso de estudio donde se adapta el problema de Programación de Proyectos con Restricciones de Recursos Multitarea, buscando la reducción de costos operacionales y considerando restricciones de secuencialidad, precedencia, capacidad de los recursos, operadores y de utilización de los recursos, a partir de decisiones de asignación de equipos y operadores a actividades requeridas para extraer diferentes productos.

En esta investigación se realiza una revisión sistemática de literatura para establecer los principales enfoques de programación, consideraciones, restricciones, métodos de solución y variaciones del problema. Como resultado, se logra definir el problema, donde se aprecia una amplia aplicación a problemas asociados en su mayoría, a métodos de solución con programación entera mixta (MIP), buscando minimizar la duración del proyecto. Se encuentran oportunidades en la generación de modelos enfocados en la reducción de costos, donde los recursos se consideren como equipos especializados con diversas capacidades, para realizar varias tareas en lugar de personal con múltiples habilidades.

Se propone una alternativa de solución al MSCRSP, considerando un modelo matemático de programación, el cual sirvió para obtener resultados óptimos al problema estudiado. El modelo minimizó el costo total de uso de los EMS por medio de la asignación de recursos a actividades, aportando una o varias habilidades, cantidad de material que debe procesar cada recurso con determinada habilidad en cada actividad, además de establecer el momento en que inicia una actividad, así como su duración y momento de finalización.

El diseño experimental se realizó para validar el rendimiento de los métodos propuestos en términos de calidad de las soluciones y tiempo computacional en diferentes escenarios probables en el sistema de operaciones de extracción minera, así como la comparación con el método actual de programación de operaciones. En este proceso se tuvo en cuenta 4 factores: método de solución, escenario, referencia de producto, tamaño de lote y humedad; se demuestra que el modelo matemático es útil en todas las instancias, en comparación con el método actual, el cual fue abordado con un ejercicio práctico de validación por parte del personal encargado de la programación de operaciones en la mina a cielo abierto objeto de estudio, arrojando muy buenos resultados en ahorros y en tiempos de programación.

Se presentan varias oportunidades para investigaciones futuras. Una de las alternativas es realizar un estudio exhaustivo del rendimiento de los métodos de solución propuestos frente a nuevas alternativas, utilizando las instancias generadas en este proyecto (e.g., disponibilidad de los EMS, simulación del nivel de inventario de productos). También, se pueden considerar otros enfoques de solución, con objetivos de impacto ambiental y social, además de entornos probabilísticos tanto de productos entrantes como de demanda.

Referencias

Almeida, B. F., Correia, I., & Saldanha-da-Gama, F. (2016). Priority-based heuristics for the multi-skill resource constrained project scheduling problem. *Expert Systems with Applications*, 57, 91-103.

Askari-Nasab, H., Pourrahimian, Y., Ben-Awuah, E., & Kalantari, S. (2011). Mixed integer linear programming formulations for open pit production scheduling. *Journal of Mining Science*, 47(3), 338.

Attia, E. A., Duquenne, P., & Le-Lann, J. M. (2014). Considering skills evolutions in multi-skilled workforce allocation with flexible working hours. *International Journal of Production Research*, 52(15), 4548-4573.

Bastante, F. G., Taboada, J., Alejano, L., & Alonso, E. (2008). Optimization tools and simulation methods for designing and evaluating a mining operation. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 22(6), 727-735.

Bellenguez-Morineau O., 2008. Methods to solve multi-skill project scheduling problem. *4OR*, 6(1), pp. 85-88. Sattarvand, J., & Niemann-Delius, C. (2008). Perspective of metaheuristic optimization methods in open pit production planning. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 24(4), 143-156.

Bellenguez-Morineau, O. (2008). Methods to solve multi-skill project scheduling problem (Doctoral dissertation, Springer-Verlag).

Bhuiyan, N., Baghel, A., & Wilson, J. (2006). A sustainable continuous improvement methodology at an aerospace company. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 55(8), 671-687.

Campos, P. H. A., Arroyo, C. E., & Morales, N. (2018). Application of optimized models through direct block scheduling in traditional mine planning. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 118(4), 381-386.

Chicoisne, R., Espinoza, D., Goycoolea, M., Moreno, E., & Rubio, E. (2012). A new algorithm for the open-pit mine production scheduling problem. *Operations Research*, 60(3), 517-528.

Correia, I., & Saldanha-da-Gama, F. (2014). The impact of fixed and variable costs in a multi-skill project scheduling problem: An empirical study. *Computers & Industrial Engineering*, 72, 230-238.

Correia, I., Lourenço, L. L., & Saldanha-da-Gama, F. (2012). Project scheduling with flexible resources: formulation and inequalities. *OR spectrum*, 34(3), 635-663.

Demeulemeester, E. L., & , W. S. (2006). Project scheduling: a research handbook (Vol. 49). Springer Science & Business Media.

Eckes, G. (2004). Six Sigma for everyone. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Economics, 128(1), 280-291.

Firat, M., & Hurkens, C. A. J. (2012). An improved MIP-based approach for a multi-skill workforce scheduling problem. *Journal of Scheduling*, 15(3), 363-380.

Firat, M., Hurkens, C. A. J., & Laugier, A. (2014). Stable multi-skill workforce assignments. *Annals of Operations Research*, 213(1), 95-114.

Goodfellow, R. C., & Dimitrakopoulos, R. (2016). Global optimization of open pit mining complexes with uncertainty. *Applied Soft Computing*, 40, 292-304.

Gupta, Pardeep (2015). Upgrading Operational Capabilities with the Implementation of TPM Initiatives in an Indian Industry: A Case Study. *Proceedings of The Second Intl. Conf. On Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering - ACSM 2015*, 2(2), 276 - 280.

Gutjahr, W. J., & Froeschl, K. A. (2013). Project portfolio selection under uncertainty with outsourcing opportunities. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 25(1-2), 255-281.

Heimerl, C., & Kolisch, R. (2010). Scheduling and staffing multiple projects with a multi-skilled workforce. *OR spectrum*, 32(2), 343-368.

Henríquez Machado, R. J. (2015). Programa de excelencia operativa en una fábrica de productos de aseo para uso doméstico (Master's thesis, Universidad de La Sabana).

Herroelen, W., & Leus, R. (2005). Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials. *European journal of operational research*, 165(2), 289-306.

Hirano, H. (2016). *JIT Implementation Manual--The Complete Guide to Just-In-Time Manufacturing: Volume 2--Waste and the 5S's*. Productivity Press.

Hirano, H., & Talbot, B. (1995). 5 pillars of the visual workplace: the sourcebook for 5S implementation/Five pillars of the visual workplace 5S shidō manyuaru (No. 658.23). Productivity Press.

Holweg, M. (2007). The genealogy of lean production. *Journal of operations management*, 25(2), 420-437.

Imai, M. (1986). *Kaizen, the key to Japan's competitive success*. New York: Random House Business Division.

Jasiulewicz-Kaczmarek, M. (2016). SWOT analysis for Planned Maintenance strategy-a case study. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 674-679.

Javanmard, S., Afshar-Nadjafi, B., & Niaki, S. T. A. (2017). Preemptive multi-skilled resource investment project scheduling problem: Mathematical modelling and solution approaches. *Computers & Chemical Engineering*, 96, 55-68.

Jayaram, J., Das, A., & Nicolae, M. (2010). Looking beyond the obvious: Unraveling the Toyota production system. *International Journal of Production Economics*, 128(1), 280-291.

Jonek-Kowalska, I., & Tchorzewski, S. (2016). Effectiveness of Machinery and Equipment in Coal Mining Critical Approach to Unification and Standardization. *Inzynieria Mineralna-Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, 2 99-105.

Kazemipoor, H., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Shahnazari-Shahrezaei, P. (2013). Solving a novel multi-skilled project scheduling model by scatter search. *South African Journal of Industrial Engineering*, 24(1), 121-131.

Kazemipoor, H., Tavakkoli-Moghaddam, R., Shahnazari-Shahrezaei, P., & Azaron, A. (2013). A differential evolution algorithm to solve multi-skilled project portfolio scheduling problems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64(5-8), 1099-1111.

Khan, A. (2018). Long-term production scheduling of open pit mines using particle swarm and bat algorithms under grade uncertainty. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 118(4), 361-368.

Kooli, A. (2012). Exact and heuristic methods for resource constrained project scheduling problem (Doctoral dissertation, Tours).

Lamghari, A., Dimitrakopoulos, R., & Ferland, J. A. (2015). A hybrid method based on linear programming and variable neighborhood descent for scheduling production in open-pit mines. *Journal of Global Optimization*, 63(3), 555-582.

Lanke, A. A., Hoseinie, S. H., & Ghodrati, B. (2016). Mine production index (MPI)-extension of OEE for bottleneck detection in mining. *International Journal of Mining Science and Technology*, 26(5), 753-760.

Lanza, G., Stoll, J., Stricker, N., Peters, S., & Lorenz, C. (2013). Measuring global production effectiveness. *Procedia CIRP*, 7, 31-36.

Li, H., & Womer, K. (2009). Scheduling projects with multi-skilled personnel by a hybrid MILP/CP benders decomposition algorithm. *Journal of Scheduling*, 12(3), 281.

Liker, J. (2004). *The Toyota way*. New York: MacGraw-Hill.

Liu, S. S., & Wang, C. J. (2012). Optimizing linear project scheduling with multi-skilled crews. *Automation in construction*, 24, 16-23.

López Arias, E. A. (2009). El mantenimiento productivo total TPM y la importancia del recurso humano para su exitosa implementación (Bachelor's thesis, Facultad de Ingeniería).

Maghsoudlou, H., Afshar-Nadjafi, B., & Niaki, S. T. A. (2016). A multi-objective invasive weeds optimization algorithm for solving multi-skill multi-mode resource constrained project scheduling problem. *Computers & Chemical Engineering*, 88, 157-169.

Maghsoudlou, H., Afshar-Nadjafi, B., & Niaki, S. T. A. (2017). Multi-skilled project scheduling with level-dependent rework risk; three multi-objective mechanisms based on cuckoo search. *Applied Soft Computing*, 54, 46-61.

Mohtasham, M., Mirzaei Nasirabad, H., & Mahmoodi Markid, A. (2017). Development of a goal programming model for optimization of truck allocation in open pit mines. *Journal of Mining and Environment*, 8(3), 359-371.

Mokhtarian Asl, M., & Sattarvand, J. (2018). Integration of commodity price uncertainty in long-term open pit mine production planning by using an imperialist competitive algorithm. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 118(2), 165-172.

Montiel, L., & Dimitrakopoulos, R. (2017). A heuristic approach for the stochastic optimization of mine production schedules. *Journal of Heuristics*, 23(5), 397-415.

Moosavi, E., Gholamnejad, J., Atae-pour, M., & Khorram, E. (2014). A hybrid augmented Lagrangian multiplier method for the open pit mines long-term production scheduling problem optimization. *Journal of Mining Science*, 50(6), 1047-1060.

Morales, N., & Reyes, P. (2016). Increasing the value and feasibility of open pit plans by integrating the mining system into the planning process. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 116(7), 663-672.

Moreno, E., Rezakhah, M., Newman, A., & Ferreira, F. (2017). Linear models for stockpiling in open-pit mine production scheduling problems. *European Journal of Operational Research*, 260(1), 212-221.

Myszkowski, P. B., Olech, Ł. P., Laszczyk, M., & Skowroński, M. E. (2018). Hybrid Differential Evolution and Greedy Algorithm (DEGR) for solving Multi-Skill Resource-Constrained Project Scheduling Problem. *Applied Soft Computing*, 62, 1-14.

Neron, E. & Boptista, D., Heuristics for the multi-skill project scheduling problem. in *International Symposium on Combinatorial Optimization (CO'2002)*. 2002.

New York: Productivity Press.

Newman, A. M., Rubio, E., Caro, R., Weintraub, A., & Eurek, K. (2010). A review of operations research in mine planning. *Interfaces*, 40(3), 222-245.

Norma ISO 13006/10545 13006. 2018. Revestimientos Cerámicos. Definición, Clasificación y Características.

Pinedo, M. L. (2008). *Scheduling: theory, algorithms, and systems*. Springer.

Qin, S., Liu, S., & Kuang, H. (2016). Piecewise linear model for multiskilled workforce scheduling problems considering learning effect and project quality. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, 11 paginas.

Rodrigues, M., & Hatakeyama, K. (2006). Analysis of the fall of TPM in companies. *Journal of Materials Processing Technology*, 179(1-3), 276-279.

Rodriguez, F., & Gomez Bravo, L. (1991). *Indicadores de calidad y productividad de la empresa*. Caracas: CAF. Recuperado desde <http://scioteca.caf.com/handle/123456789/863>.

Shishvan, M. S., & Sattarvand, J. (2015). Long term production planning of open pit mines by ant colony optimization. *European Journal of Operational Research*, 240(3), 825-836.

Silva, M. D. F., Dimitrakopoulos, R., & Lamghari, A. (2015). Solving a large SIP model for production scheduling at a gold mine with multiple processing streams and uncertain geology. *Mining Technology*, 124(1), 24-33.

Soibelman, L., Sacks, R., Akinci, B., Dikmen, I., Birgonul, M. T., & Eybpoosh, M. (2010). Preparing civil engineers for international collaboration in construction management. *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, 137(3), 141-150.

Soto, P. L. (2013). Contraste de hipótesis. Comparación de más de dos medias independientes mediante pruebas no paramétricas: Prueba de Kruskal-Wallis. *Revista Enfermería del Trabajo*, 3(4), 166-171.

Upadhyay, S. P., & Askari-Nasab, H. (2018). Simulation and optimization approach for uncertainty-based short-term planning in open pit mines. *International Journal of Mining Science and Technology*, 28(2), 153-166.

Valencia, J. A. A., & Araújo, J. J. O. (2008). *Fundamentos de inferencia estadística*. Pontificia Universidad Javeriana.

Villa Buitrago, H. J. Un método para la definición de indicadores clave de rendimiento con base en objetivos de mejoramiento (Master's thesis, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín).

Wang, L., & Zheng, X. L. (2018). A knowledge-guided multi-objective fruit fly optimization algorithm for the multi-skill resource constrained project scheduling problem. *Swarm and Evolutionary Computation*, 38, 54-63.

Wongwai, N., & Malaikrisanachalee, S. (2011). Augmented heuristic algorithm for multi-skilled resource scheduling. *Automation in Construction*, 20(4), 429-445.

Xu, X. C., Gu, X. W., Wang, Q., Gao, X. W., Liu, J. P., Wang, Z. K., & Wang, X. H. (2018). Production scheduling optimization considering ecological costs for open pit metal mines. *Journal of Cleaner Production*, 180, 210-221.

Yannibelli, V., & Amandi, A. (2011). A knowledge-based evolutionary assistant to software development project scheduling. *Expert Systems with Applications*, 38(7), 8403-8413.

Zarubin, M., Statsenko, L., Zarubina, V., & Fionin, E. (2017). Developing information systems of operation schedules to stabilize the grade of a mineral. *Mining of Mineral Deposits*, 2017.

Zhu, L., Su, H., Lu, S., Wang, Y., & Zhang, Q. (2014). Coordinating and evaluating of multiple key performance indicators for manufacturing equipment: Case study of distillation column. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 22(7), 805-811.

Anexos

Anexo 1. Resultados de modelo monoproducto sin asignación de operadores

Humedad	Producto	Tamaño de lote	MODELO MATEMÁTICO				PROCESO ACTUAL		
			Z	Lower bound	Gap	Tiempo computacional (segundos)	Costo actual de uso de EMS	Tiempo de programación actual (segundos)	Ahorro (\$)
Alta	1	Grande	994,868,354	994,868,354	0.00%	0.420	\$1,010,068,384	1,260	15,200,031
Alta	1	Mediano	829,056,961	829,056,961	0.00%	0.411	\$843,394,175	1,500	14,337,213
Alta	1	Pequeño	663,245,569	663,245,569	0.00%	0.400	\$675,761,062	1,260	12,515,493
Alta	2	Grande	659,338,076	659,338,076	0.00%	0.406	\$745,440,065	1,620	86,101,989
Alta	2	Mediano	571,984,647	571,984,647	0.00%	0.386	\$628,041,477	1,680	56,056,831
Alta	2	Pequeño	439,558,717	439,558,717	0.00%	0.387	\$512,278,617	1,500	72,719,900
Alta	3	Grande	488,086,101	488,086,101	0.00%	0.370	\$554,754,707	1,560	66,668,606
Alta	3	Mediano	303,079,514	303,079,514	0.00%	0.407	\$417,456,525	1,200	114,377,011
Alta	3	Pequeño	187,856,345	187,856,345	0.00%	0.330	\$199,378,653	1,560	11,522,307
Media	1	Grande	965,425,334	965,425,334	0.00%	0.446	\$1,005,942,386	1,740	40,517,052
Media	1	Mediano	804,521,112	804,521,112	0.00%	0.719	\$837,080,711	1,800	32,559,600
Media	1	Pequeño	643,616,889	643,616,889	0.00%	0.390	\$655,982,836	1,500	12,365,947
Media	2	Grande	576,922,066	576,922,066	0.00%	0.399	\$772,306,901	1,200	195,384,835
Media	2	Mediano	503,304,638	503,304,638	0.00%	0.406	\$645,855,019	1,800	142,550,381
Media	2	Pequeño	384,614,711	384,614,711	0.00%	0.541	\$516,605,149	1,200	131,990,438
Media	3	Grande	428,147,184	428,147,184	0.00%	0.390	\$550,724,847	1,620	122,577,662
Media	3	Mediano	292,128,619	292,128,619	0.00%	0.391	\$413,488,236	1,500	121,359,617
Media	3	Pequeño	182,597,561	182,597,561	0.00%	0.350	\$194,693,989	1,740	12,096,428
Baja	1	Grande	936,334,526	936,334,526	0.00%	0.411	\$961,929,887	1,320	25,595,361
Baja	1	Mediano	780,278,772	780,278,772	0.00%	0.537	\$799,575,659	1,560	19,296,888
Baja	1	Pequeño	624,223,017	624,223,017	0.00%	0.400	\$654,274,135	1,680	30,051,118
Baja	2	Grande	529,268,053	529,268,053	0.00%	0.356	\$746,595,843	1,740	217,327,791
Baja	2	Mediano	443,645,835	443,645,835	0.00%	0.410	\$605,869,890	1,620	162,224,054
Baja	2	Pequeño	352,845,368	352,845,368	0.00%	0.381	\$505,910,274	1,620	153,064,906
Baja	3	Grande	385,906,515	385,906,515	0.00%	0.374	\$547,892,525	1,560	161,986,010
Baja	3	Mediano	283,250,358	283,250,358	0.00%	0.417	\$372,478,273	1,500	89,227,915
Baja	3	Pequeño	177,338,777	177,338,777	0.00%	0.408	\$188,443,053	1,740	11,104,275
Promedio			534,497,912	534,497,912	0.00%	0.416	613,415,677	1,540	78,917,765

Anexo 2. Resultados de modelo monoproducto con asignación de operadores

Humedad	Producto	Tamaño de lote	MODELO MATEMÁTICO				PROCESO ACTUAL		
			Z	Lower bound	Gap	Tiempo computacional (segundos)	Costo actual de uso de EMS	Tiempo de programación actual (segundos)	Ahorro (\$)
Alta	1	Grande	1,002,586,488	1,002,586,488	0.00%	1.344	\$1,010,068,384	2,640	7,481,896
Alta	1	Mediano	835,488,740	835,488,740	0.00%	1.125	\$843,394,175	2,460	7,905,435
Alta	1	Pequeño	668,390,992	668,390,992	0.00%	0.999	\$675,761,062	3,000	7,370,070
Alta	2	Grande	694,458,442	694,458,442	0.00%	0.969	\$745,424,529	2,460	50,966,087
Alta	2	Mediano	601,251,618	601,251,618	0.00%	1.047	\$628,041,477	2,820	26,789,859
Alta	2	Pequeño	462,972,294	462,972,294	0.00%	0.766	\$512,278,617	2,580	49,306,323
Alta	3	Grande	513,628,185	513,628,185	0.00%	1.111	\$554,754,707	2,520	41,126,522
Alta	3	Mediano	312,490,514	312,490,514	0.00%	1.000	\$417,456,525	2,400	104,966,011
Alta	3	Pequeño	188,465,479	188,465,479	0.00%	1.126	\$199,378,653	1,980	10,913,173
Media	1	Grande	969,852,204	969,852,204	0.00%	0.812	\$1,005,942,386	2,220	36,090,181
Media	1	Mediano	808,210,170	808,210,170	0.00%	0.890	\$837,080,711	2,220	28,870,541
Media	1	Pequeño	646,568,136	646,568,136	0.00%	0.783	\$655,982,836	2,580	9,414,700
Media	2	Grande	612,066,452	612,066,452	0.00%	0.844	\$772,306,901	2,640	160,240,450
Media	2	Mediano	532,591,626	532,591,626	0.00%	0.796	\$645,855,019	2,880	113,263,393
Media	2	Pequeño	408,044,301	408,044,301	0.00%	0.906	\$516,605,149	2,820	108,560,848
Media	3	Grande	453,706,737	453,706,737	0.00%	1.059	\$550,724,847	2,940	97,018,109
Media	3	Mediano	294,493,828	294,493,828	0.00%	0.953	\$413,488,236	2,280	118,994,408
Media	3	Pequeño	183,215,430	183,215,430	0.00%	0.927	\$194,832,656	1,920	11,617,226
Baja	1	Grande	940,805,069	940,805,069	0.00%	0.812	\$961,929,887	2,940	21,124,818
Baja	1	Mediano	784,004,224	784,004,224	0.00%	0.766	\$799,575,659	1,920	15,571,435
Baja	1	Pequeño	627,203,379	627,203,379	0.00%	0.797	\$654,274,135	2,580	27,070,756
Baja	2	Grande	533,723,302	533,723,302	0.00%	0.819	\$746,595,843	2,940	212,872,542
Baja	2	Mediano	463,931,635	463,931,635	0.00%	1.114	\$605,869,890	2,400	141,938,255
Baja	2	Pequeño	355,815,534	355,815,534	0.00%	0.989	\$505,910,274	2,040	150,094,740
Baja	3	Grande	393,785,290	393,785,290	0.00%	0.766	\$547,892,525	2,280	154,107,235
Baja	3	Mediano	284,591,521	284,591,521	0.00%	0.781	\$372,478,273	1,980	87,886,752
Baja	3	Pequeño	177,965,380	177,965,380	0.00%	0.782	\$188,443,053	2,100	10,477,672
Promedio			546,307,666	546,307,666	0.00%	0.929	613,420,237	2,464	67,112,572

Anexo 3. Resultados de modelo multiproducto sin asignación de operadores

Humedad	Tamaño de lote p1	Tamaño de lote p2	Tamaño de lote p3	MODELO MATEMÁTICO				MODELO ACTUAL		
				Z modelo	Lower bound	Gap	Tiempo computacional (segundos)	Costo actual de uso de EMS	Tiempo de programación actual (segundos)	Ahorro (\$)
Alta	Grande	Grande	Grande	1,817,342,288	1,817,342,288	0.00%	1.441	2,310,263,155	4,440	492,920,867
Alta	Grande	Grande	Mediano	1,727,001,216	1,727,001,216	0.00%	1.363	2,172,964,973	4,800	445,963,758
Alta	Grande	Grande	Pequeño	1,636,660,143	1,636,660,143	0.00%	1.376	1,954,887,101	4,020	318,226,958
Alta	Grande	Mediano	Grande	1,735,958,754	1,735,958,754	0.00%	1.276	2,192,864,568	4,680	456,905,814
Alta	Grande	Mediano	Mediano	1,645,617,682	1,645,617,682	0.00%	1.348	2,055,566,386	4,020	409,948,704
Alta	Grande	Mediano	Pequeño	1,555,276,609	1,555,276,609	0.00%	1.445	1,837,488,514	5,160	282,211,905
Alta	Grande	Pequeño	Grande	1,654,575,220	1,654,575,220	0.00%	1.236	2,077,101,708	4,500	422,526,488
Alta	Grande	Pequeño	Mediano	1,564,234,148	1,564,234,148	0.00%	1.219	1,939,803,526	3,840	375,569,379
Alta	Grande	Pequeño	Pequeño	1,473,893,075	1,473,893,075	0.00%	1.215	1,721,725,654	4,140	247,832,579
Alta	Mediano	Grande	Grande	1,655,436,150	1,655,436,150	0.00%	1.283	2,143,588,946	4,260	488,152,796
Alta	Mediano	Grande	Mediano	1,564,769,006	1,564,769,006	0.00%	1.253	2,006,290,764	4,380	441,521,758
Alta	Mediano	Grande	Pequeño	1,474,427,934	1,474,427,934	0.00%	1.259	1,788,212,892	4,500	313,784,958
Alta	Mediano	Mediano	Grande	1,573,837,922	1,573,837,922	0.00%	1.210	2,026,190,359	4,020	452,352,437
Alta	Mediano	Mediano	Mediano	1,573,837,922	1,573,837,922	0.00%	1.222	1,888,892,177	4,380	315,054,255
Alta	Mediano	Mediano	Pequeño	1,393,044,400	1,393,044,400	0.00%	1.201	1,670,814,305	5,100	277,769,905
Alta	Mediano	Pequeño	Grande	1,492,343,011	1,492,343,011	0.00%	1.221	1,910,427,499	4,200	418,084,488
Alta	Mediano	Pequeño	Mediano	1,402,001,938	1,402,001,938	0.00%	1.214	1,773,129,317	4,020	371,127,379
Alta	Mediano	Pequeño	Pequeño	1,311,660,866	1,311,660,866	0.00%	1.212	1,555,051,445	4,260	243,390,579
Alta	Pequeño	Grande	Grande	1,494,231,407	1,494,231,407	0.00%	1.272	1,975,955,833	4,800	481,724,427
Alta	Pequeño	Grande	Mediano	1,402,769,279	1,402,769,279	0.00%	1.222	1,838,657,651	4,440	435,888,372
Alta	Pequeño	Grande	Pequeño	1,312,219,371	1,312,219,371	0.00%	1.283	1,620,579,780	4,440	308,360,408
Alta	Pequeño	Mediano	Grande	1,412,315,025	1,412,315,025	0.00%	1.309	1,858,557,246	4,260	446,242,221

Alta	Pequeño	Mediano	Mediano	1,321,153,263	1,321,153,263	0.00%	1.279	1,721,259,064	4,260	400,105,801
Alta	Pequeño	Mediano	Pequeño	1,230,899,032	1,230,899,032	0.00%	1.215	1,503,181,192	4,680	272,282,160
Alta	Pequeño	Pequeño	Grande	1,330,407,557	1,330,407,557	0.00%	1.238	1,742,794,386	4,860	412,386,829
Alta	Pequeño	Pequeño	Mediano	1,239,769,729	1,239,769,729	0.00%	1.198	1,605,496,204	4,440	365,726,475
Alta	Pequeño	Pequeño	Pequeño	1,149,578,692	1,149,578,692	0.00%	1.252	1,387,418,332	4,380	237,839,640
Media	Grande	Grande	Grande	1,770,665,518	1,770,665,518	0.00%	1.212	2,328,974,134	4,560	558,308,616
Media	Grande	Grande	Mediano	1,682,336,749	1,682,336,749	0.00%	1.219	2,191,737,523	4,500	509,400,774
Media	Grande	Grande	Pequeño	1,594,007,980	1,594,007,980	0.00%	1.229	1,972,943,276	4,860	378,935,297
Media	Grande	Mediano	Grande	1,691,126,595	1,691,126,595	0.00%	1.234	2,202,522,252	4,440	511,395,656
Media	Grande	Mediano	Mediano	1,602,797,826	1,602,797,826	0.00%	1.202	2,065,285,641	4,380	462,487,814
Media	Grande	Mediano	Pequeño	1,514,469,057	1,514,469,057	0.00%	1.267	1,846,491,394	5,100	332,022,337
Media	Grande	Pequeño	Grande	1,611,587,673	1,611,587,673	0.00%	1.195	2,073,272,381	4,440	461,684,709
Media	Grande	Pequeño	Mediano	1,523,258,903	1,523,258,903	0.00%	1.198	1,936,035,770	4,500	412,776,867
Media	Grande	Pequeño	Pequeño	1,434,930,134	1,434,930,134	0.00%	1.222	1,717,241,524	4,500	282,311,390
Media	Mediano	Grande	Grande	1,613,199,265	1,613,199,265	0.00%	1.229	2,160,112,459	4,260	546,913,194
Media	Mediano	Grande	Mediano	1,524,697,854	1,524,697,854	0.00%	1.223	2,022,875,848	4,440	498,177,994
Media	Mediano	Grande	Pequeño	1,436,369,085	1,436,369,085	0.00%	1.251	1,804,081,602	4,380	367,712,517
Media	Mediano	Mediano	Grande	1,533,487,701	1,533,487,701	0.00%	1.213	2,033,660,577	4,020	500,172,876
Media	Mediano	Mediano	Mediano	1,445,158,932	1,445,158,932	0.00%	1.276	1,896,423,966	4,620	451,265,034
Media	Mediano	Mediano	Pequeño	1,356,830,162	1,356,830,162	0.00%	1.207	1,677,629,720	4,620	320,799,557
Media	Mediano	Pequeño	Grande	1,453,948,778	1,453,948,778	0.00%	1.246	1,904,410,707	4,980	450,461,929
Media	Mediano	Pequeño	Mediano	1,365,620,009	1,365,620,009	0.00%	1.282	1,767,174,096	4,380	401,554,087
Media	Mediano	Pequeño	Pequeño	1,277,291,240	1,277,291,240	0.00%	1.203	1,548,379,849	4,440	271,088,610
Media	Pequeño	Grande	Grande	1,456,297,396	1,456,297,396	0.00%	1.228	1,979,014,584	4,020	522,717,188
Media	Pequeño	Grande	Mediano	1,367,101,892	1,367,101,892	0.00%	1.248	1,841,777,973	4,440	474,676,080
Media	Pequeño	Grande	Pequeño	1,278,730,191	1,278,730,191	0.00%	1.220	1,622,983,726	4,860	344,253,536

Media	Pequeño	Mediano	Grande	1,376,269,460	1,376,269,460	0.00%	1.242	1,852,562,702	4,860	476,293,241
Media	Pequeño	Mediano	Mediano	1,287,520,037	1,287,520,037	0.00%	1.274	1,715,326,091	4,440	427,806,053
Media	Pequeño	Mediano	Pequeño	1,199,191,268	1,199,191,268	0.00%	1.303	1,496,531,844	4,380	297,340,576
Media	Pequeño	Pequeño	Grande	1,296,482,267	1,296,482,267	0.00%	1.296	1,723,312,831	4,320	426,830,564
Media	Pequeño	Pequeño	Mediano	1,207,981,114	1,207,981,114	0.00%	1.205	1,586,076,220	4,860	378,095,106
Media	Pequeño	Pequeño	Pequeño	1,119,652,345	1,119,652,345	0.00%	1.203	1,367,281,974	4,680	247,629,629
Baja	Grande	Grande	Grande	1,723,988,748	1,723,988,748	0.00%	1.205	2,256,418,256	4,620	532,429,507
Baja	Grande	Grande	Mediano	1,637,672,282	1,637,672,282	0.00%	1.959	2,081,004,003	4,620	443,331,721
Baja	Grande	Grande	Pequeño	1,551,355,816	1,551,355,816	0.00%	1.224	1,896,968,783	3,780	345,612,967
Baja	Grande	Mediano	Grande	1,646,294,437	1,646,294,437	0.00%	1.236	2,115,692,302	4,440	469,397,865
Baja	Grande	Mediano	Mediano	1,559,977,971	1,559,977,971	0.00%	1.244	1,940,278,049	5,040	380,300,079
Baja	Grande	Mediano	Pequeño	1,473,661,505	1,473,661,505	0.00%	1.269	1,756,242,829	4,080	282,581,324
Baja	Grande	Pequeño	Grande	1,568,600,125	1,568,600,125	0.00%	1.260	2,015,732,686	4,200	447,132,561
Baja	Grande	Pequeño	Mediano	1,482,283,659	1,482,283,659	0.00%	1.217	1,840,318,434	4,500	358,034,775
Baja	Grande	Pequeño	Pequeño	1,395,967,193	1,395,967,193	0.00%	1.213	1,656,283,214	4,140	260,316,020
Baja	Mediano	Grande	Grande	1,570,962,380	1,570,962,380	0.00%	1.256	2,094,064,028	5,100	523,101,648
Baja	Mediano	Grande	Mediano	1,484,626,703	1,484,626,703	0.00%	1.253	1,918,649,776	4,080	434,023,073
Baja	Mediano	Grande	Pequeño	1,398,310,237	1,398,310,237	0.00%	1.246	1,734,614,556	4,680	336,304,319
Baja	Mediano	Mediano	Grande	1,398,310,237	1,398,310,237	0.00%	1.207	1,953,338,075	4,620	555,027,838
Baja	Mediano	Mediano	Mediano	1,406,932,391	1,406,932,391	0.00%	1.209	1,777,923,822	4,560	370,991,431
Baja	Mediano	Mediano	Pequeño	1,320,615,925	1,320,615,925	0.00%	1.262	1,593,888,602	4,080	273,272,677
Baja	Mediano	Pequeño	Grande	1,415,554,546	1,415,554,546	0.00%	1.188	1,853,378,459	4,440	437,823,914
Baja	Mediano	Pequeño	Mediano	1,329,238,080	1,329,238,080	0.00%	1.225	1,677,964,207	4,680	348,726,127
Baja	Mediano	Pequeño	Pequeño	1,242,921,614	1,242,921,614	0.00%	1.221	1,493,928,986	5,160	251,007,373
Baja	Pequeño	Grande	Grande	1,418,363,386	1,418,363,386	0.00%	1.225	1,948,762,504	4,320	530,399,118
Baja	Pequeño	Grande	Mediano	1,331,581,123	1,331,581,123	0.00%	1.310	1,773,348,252	4,440	441,767,128

Baja	Pequeño	Grande	Pequeño	1,245,264,657	1,245,264,657	0.00%	1.248	1,589,313,031	4,500	344,048,374
Baja	Pequeño	Mediano	Grande	1,340,421,208	1,340,421,208	0.00%	1.247	1,808,036,550	4,380	467,615,342
Baja	Pequeño	Mediano	Mediano	1,253,886,812	1,253,886,812	0.00%	1.264	1,632,622,298	3,840	378,735,486
Baja	Pequeño	Mediano	Pequeño	1,167,570,346	1,167,570,346	0.00%	1.251	1,448,587,078	4,500	281,016,732
Baja	Pequeño	Pequeño	Grande	1,262,556,978	1,262,556,978	0.00%	1.203	1,708,076,935	4,860	445,519,957
Baja	Pequeño	Pequeño	Mediano	1,176,192,500	1,176,192,500	0.00%	1.272	1,532,662,682	4,920	356,470,182
Baja	Pequeño	Pequeño	Pequeño	1,089,876,034	1,089,876,034	0.00%	1.297	1,348,627,462	4,740	258,751,428
Promedio				1,403,443,959	1,403,443,959	0.00%	1.267	1,794,323,180	4,493	390,879,221

Anexo 4. Resultados de modelo multiproducto con asignación de operadores

Humedad	Tamaño de lote p1	Tamaño de lote p2	Tamaño de lote p3	MODELO MATEMÁTICO				MODELO ACTUAL		Ahorro (\$)
				Z modelo	Lower bound	Gap	Tiempo computacional (segundos)	Costo actual de uso de EMS	Tiempo de programación actual (segundos)	
Alta	Grande	Grande	Grande	1,699,436,905	1,699,436,905	0.00%	14.427	2,310,247,620	7,380	610,810,714
Alta	Grande	Grande	Mediano	1,612,286,295	1,612,286,295	0.00%	14.061	2,172,949,438	7,800	560,663,143
Alta	Grande	Grande	Pequeño	1,525,135,684	1,525,135,684	0.00%	14.154	1,954,871,566	7,560	429,735,881
Alta	Grande	Mediano	Grande	1,619,548,846	1,619,548,846	0.00%	25.021	2,192,864,568	6,960	573,315,723
Alta	Grande	Mediano	Mediano	1,532,398,235	1,532,398,235	0.00%	22.779	2,055,566,386	6,420	523,168,151
Alta	Grande	Mediano	Pequeño	1,445,247,625	1,445,247,625	0.00%	18.106	1,837,488,514	6,600	392,240,890
Alta	Grande	Pequeño	Grande	1,539,660,786	1,539,660,786	0.00%	14.152	2,077,101,708	7,800	537,440,922
Alta	Grande	Pequeño	Mediano	1,452,510,175	1,452,510,175	0.00%	14.251	1,939,803,526	7,260	487,293,351
Alta	Grande	Pequeño	Pequeño	1,365,359,565	1,365,359,565	0.00%	16.360	1,721,725,654	7,440	356,366,089
Alta	Mediano	Grande	Grande	1,554,185,888	1,554,185,888	0.00%	17.407	2,143,573,410	6,420	589,387,523
Alta	Mediano	Grande	Mediano	1,467,035,277	1,467,035,277	0.00%	14.112	2,006,275,228	6,180	539,239,951
Alta	Mediano	Grande	Pequeño	1,379,884,667	1,379,884,667	0.00%	14.860	1,788,197,356	6,600	408,312,690
Alta	Mediano	Mediano	Grande	1,474,297,828	1,474,297,828	0.00%	14.683	2,026,190,359	7,200	551,892,531
Alta	Mediano	Mediano	Mediano	1,387,147,218	1,387,147,218	0.00%	14.411	1,888,892,177	6,900	501,744,959
Alta	Mediano	Mediano	Pequeño	1,299,996,607	1,299,996,607	0.00%	14.369	1,670,814,305	7,680	370,817,698
Alta	Mediano	Pequeño	Grande	1,394,409,768	1,394,409,768	0.00%	14.271	1,910,427,499	7,380	516,017,730
Alta	Mediano	Pequeño	Mediano	1,307,259,158	1,307,259,158	0.00%	14.673	1,773,129,317	7,320	465,870,159
Alta	Mediano	Pequeño	Pequeño	1,220,108,547	1,220,108,547	0.00%	14.122	1,555,051,445	7,740	334,942,898
Alta	Pequeño	Grande	Grande	1,408,934,870	1,408,934,870	0.00%	14.459	1,975,940,298	6,900	567,005,428
Alta	Pequeño	Grande	Mediano	1,321,784,260	1,321,784,260	0.00%	14.073	1,838,642,116	7,680	516,857,856
Alta	Pequeño	Grande	Pequeño	1,234,633,649	1,234,633,649	0.00%	14.239	1,620,564,244	8,040	385,930,595
Alta	Pequeño	Mediano	Grande	1,329,046,811	1,329,046,811	0.00%	14.384	1,858,557,246	7,440	529,510,436
Alta	Pequeño	Mediano	Mediano	1,241,896,200	1,241,896,200	0.00%	19.740	1,721,259,064	7,800	479,362,864
Alta	Pequeño	Mediano	Pequeño	1,154,745,589	1,154,745,589	0.00%	16.906	1,503,181,192	7,080	348,435,603
Alta	Pequeño	Pequeño	Grande	1,249,158,751	1,249,158,751	0.00%	19.173	1,742,794,386	6,960	493,635,635

Alta	Pequeño	Pequeño	Mediano	1,162,008,140	1,162,008,140	0.00%	17.040	1,605,496,204	8,220	443,488,064
Alta	Pequeño	Pequeño	Pequeño	1,074,857,530	1,074,857,530	0.00%	15.307	1,387,418,332	7,200	312,560,802
Media	Grande	Grande	Grande	1,662,663,481	1,662,663,481	0.00%	16.780	2,328,974,134	7,920	666,310,652
Media	Grande	Grande	Mediano	1,577,398,687	1,577,398,687	0.00%	15.664	2,191,737,523	7,440	614,338,835
Media	Grande	Grande	Pequeño	1,492,133,894	1,492,133,894	0.00%	15.455	1,973,081,943	6,960	480,948,049
Media	Grande	Mediano	Grande	1,584,504,087	1,584,504,087	0.00%	13.441	2,202,522,252	7,080	618,018,165
Media	Grande	Mediano	Mediano	1,499,239,293	1,499,239,293	0.00%	14.202	2,065,285,641	7,980	566,046,347
Media	Grande	Mediano	Pequeño	1,413,974,499	1,413,974,499	0.00%	13.096	1,846,630,061	7,080	432,655,562
Media	Grande	Pequeño	Grande	1,506,344,693	1,506,344,693	0.00%	13.097	2,073,272,381	7,380	566,927,689
Media	Grande	Pequeño	Mediano	1,421,079,899	1,421,079,899	0.00%	13.156	1,936,035,770	6,900	514,955,872
Media	Grande	Pequeño	Pequeño	1,335,815,105	1,335,815,105	0.00%	13.123	1,717,380,190	6,420	381,565,086
Media	Mediano	Grande	Grande	1,520,555,492	1,520,555,492	0.00%	13.098	2,160,112,459	6,960	639,556,968
Media	Mediano	Grande	Mediano	1,435,290,698	1,435,290,698	0.00%	14.514	2,022,875,848	7,020	587,585,151
Media	Mediano	Grande	Pequeño	1,350,025,904	1,350,025,904	0.00%	14.050	1,804,220,269	7,560	454,194,365
Media	Mediano	Mediano	Grande	1,442,396,097	1,442,396,097	0.00%	13.159	2,033,660,577	7,440	591,264,480
Media	Mediano	Mediano	Mediano	1,357,131,303	1,357,131,303	0.00%	13.315	1,896,423,966	7,140	539,292,663
Media	Mediano	Mediano	Pequeño	1,271,866,509	1,271,866,509	0.00%	13.956	1,677,768,386	6,780	405,901,877
Media	Mediano	Pequeño	Grande	1,364,236,703	1,364,236,703	0.00%	14.021	1,904,410,707	7,920	540,174,004
Media	Mediano	Pequeño	Mediano	1,278,971,909	1,278,971,909	0.00%	14.182	1,767,174,096	6,660	488,202,187
Media	Mediano	Pequeño	Pequeño	1,193,707,115	1,193,707,115	0.00%	13.927	1,548,518,516	6,660	354,811,401
Media	Pequeño	Grande	Grande	1,378,447,502	1,378,447,502	0.00%	14.010	1,979,014,584	7,560	600,567,082
Media	Pequeño	Grande	Mediano	1,293,182,708	1,293,182,708	0.00%	14.119	1,841,777,973	7,260	548,595,265
Media	Pequeño	Grande	Pequeño	1,207,917,914	1,207,917,914	0.00%	26.147	1,623,122,393	7,500	415,204,479
Media	Pequeño	Mediano	Grande	1,300,288,107	1,300,288,107	0.00%	14.065	1,852,562,702	7,020	552,274,594
Media	Pequeño	Mediano	Mediano	1,215,023,313	1,215,023,313	0.00%	14.206	1,715,326,091	6,960	500,302,777
Media	Pequeño	Mediano	Pequeño	1,129,758,519	1,129,758,519	0.00%	14.009	1,496,670,511	6,900	366,911,991
Media	Pequeño	Pequeño	Grande	1,222,128,713	1,222,128,713	0.00%	14.015	1,723,312,831	6,900	501,184,118
Media	Pequeño	Pequeño	Mediano	1,136,863,919	1,136,863,919	0.00%	14.103	1,586,076,220	7,860	449,212,301
Media	Pequeño	Pequeño	Pequeño	1,051,599,125	1,051,599,125	0.00%	14.106	1,367,420,640	7,020	315,821,515

Baja	Grande	Grande	Grande	1,625,890,058	1,625,890,058	0.00%	14.183	2,256,418,256	7,260	630,528,198
Baja	Grande	Grande	Mediano	1,542,511,080	1,542,511,080	0.00%	14.530	2,081,004,003	7,800	538,492,923
Baja	Grande	Grande	Pequeño	1,459,132,103	1,459,132,103	0.00%	14.020	1,896,968,783	6,960	437,836,680
Baja	Grande	Mediano	Grande	1,549,459,328	1,549,459,328	0.00%	14.111	2,115,692,302	7,260	566,232,974
Baja	Grande	Mediano	Mediano	1,466,080,351	1,466,080,351	0.00%	14.144	1,940,278,049	7,500	474,197,698
Baja	Grande	Mediano	Pequeño	1,382,701,374	1,382,701,374	0.00%	14.224	1,756,242,829	7,320	373,541,455
Baja	Grande	Pequeño	Grande	1,473,028,599	1,473,028,599	0.00%	14.163	2,015,732,686	6,840	542,704,087
Baja	Grande	Pequeño	Mediano	1,389,649,622	1,389,649,622	0.00%	14.274	1,840,318,434	7,560	450,668,812
Baja	Grande	Pequeño	Pequeño	1,306,270,645	1,306,270,645	0.00%	14.386	1,656,283,214	6,660	350,012,569
Baja	Mediano	Grande	Grande	1,486,925,095	1,486,925,095	0.00%	14.097	2,094,064,028	7,440	607,138,933
Baja	Mediano	Grande	Mediano	1,403,546,118	1,403,546,118	0.00%	14.297	1,918,649,776	6,660	515,103,658
Baja	Mediano	Grande	Pequeño	1,320,167,141	1,320,167,141	0.00%	14.107	1,734,614,556	7,560	414,447,415
Baja	Mediano	Mediano	Grande	1,410,494,366	1,410,494,366	0.00%	14.215	1,953,338,075	7,020	542,843,709
Baja	Mediano	Mediano	Mediano	1,327,115,389	1,327,115,389	0.00%	14.202	1,777,923,822	6,840	450,808,433
Baja	Mediano	Mediano	Pequeño	1,243,736,412	1,243,736,412	0.00%	14.157	1,593,888,602	7,800	350,152,190
Baja	Mediano	Pequeño	Grande	1,334,063,637	1,334,063,637	0.00%	14.395	1,853,378,459	6,960	519,314,822
Baja	Mediano	Pequeño	Mediano	1,250,684,660	1,250,684,660	0.00%	14.359	1,677,964,207	7,260	427,279,547
Baja	Mediano	Pequeño	Pequeño	1,167,305,682	1,167,305,682	0.00%	14.063	1,493,928,986	6,960	326,623,304
Baja	Pequeño	Grande	Grande	1,347,960,133	1,347,960,133	0.00%	14.188	1,948,762,504	7,560	600,802,371
Baja	Pequeño	Grande	Mediano	1,264,581,156	1,264,581,156	0.00%	14.321	1,773,348,252	6,960	508,767,096
Baja	Pequeño	Grande	Pequeño	1,181,202,179	1,181,202,179	0.00%	14.191	1,589,313,031	7,740	408,110,853
Baja	Pequeño	Mediano	Grande	1,271,529,404	1,271,529,404	0.00%	14.156	1,808,036,550	6,600	536,507,146
Baja	Pequeño	Mediano	Mediano	1,188,150,427	1,188,150,427	0.00%	14.065	1,632,622,298	7,440	444,471,871
Baja	Pequeño	Mediano	Pequeño	1,104,771,449	1,104,771,449	0.00%	14.251	1,448,587,078	7,320	343,815,628
Baja	Pequeño	Pequeño	Grande	1,195,098,675	1,195,098,675	0.00%	14.271	1,708,076,935	7,320	512,978,260
Baja	Pequeño	Pequeño	Mediano	1,111,719,697	1,111,719,697	0.00%	14.115	1,532,662,682	7,080	420,942,985
Baja	Pequeño	Pequeño	Pequeño	1,028,340,720	1,028,340,720	0.00%	14.387	1,348,627,462	6,780	320,286,742
Promedio				1,327,115,389	1,327,115,389	-	14.217	1,794,323,180	7,202	467,207,791