



## **Escuela de Postgrado GERENS**

### **Maestría en Gestión Minera**

#### **MGM - Promoción 2017**

#### **“BENEFICIOS Y DESAFÍOS DE LA GESTIÓN INTEGRADA MINA - PLANTA”**

Trabajo de investigación presentado de acuerdo a los reglamentos de la Escuela de Postgrado GERENS para obtener el grado de Magíster en

Gestión Minera, por:

Alberto Vladimir Morote Guevara \_\_\_\_\_

Ronoel Vega Cahuana \_\_\_\_\_

Sedric Manuel Pareja Poccori \_\_\_\_\_

ASESORES: Dr. Rodrigo Prialé Zevallos y Dra. Ana Rosa Adaniya Guevara

Lima, 30 de Junio del 2019

Copyright © 2018 por Sedic Manuel Pareja Poccori, Alberto Vladimir Morote Guevara, Ronoel Vega Cahuana. Todos los derechos reservados.

## **Dedicatoria**

iii

Este trabajo está dedicado a toda mi familia en especial a mi madre.

Alberto Morote

A mis padres y amigos que me dieron todo su apoyo.

Ronoel Vega

A mi familia, razón de todos mis esfuerzos.

Manuel Pareja

## **Agradecimientos**

iv

Al profesor Rodrigo Prialé Zevallos y Ana Rosa Adaniya Guevara, por su orientación y dedicación para que este trabajo cumpla con los objetivos trazados.

A nuestros colegas y amigos del programa de maestría 2015 por sus observaciones y porque en todo momento nos incentivaron para que culminemos este trabajo.

A los profesores de la Escuela de Postgrado GERENS, principalmente al profesor Armando Gallegos por sus observaciones teóricas que me sirvieron de mucho.

A todos los consultores, proveedores y operadores que brindaron valiosa información para el desarrollo de esta investigación.

A nuestros compañeros de trabajo y a todas aquellas personas que indirectamente nos ayudaron para culminar este estudio, por su invaluable apoyo.

*Mine to Mill* es una estrategia de integración entre la mina y la planta que tiene como una de sus ideas principales el incrementar el uso de los explosivos en la voladura para disminuir el consumo de energía eléctrica o incrementar el tonelaje procesado en planta. Este es un concepto que de por sí pareciera muy simple, pero en la práctica, su implementación es muy compleja.

En este trabajo se analizan los beneficios que demostradamente se pueden alcanzar con la implementación del *Mine to Mill* y además de los desafíos que en la misma se deben superar. Para ello se han usado tres fuentes: en primer lugar el análisis y síntesis de estudios previos con base empírica presentados o publicados en congresos mundiales, en segundo lugar, los resultados de una encuesta a personas ligadas a nivel mundial a la implementación de proyectos *Mine to Mill*, ya sea como gerentes de las empresas mineras o como consultores expertos del proyecto de implementación y en tercer lugar se hizo un análisis económico de dos casos en los que se había aplicado el *Mine to Mill* donde se evidencia la rentabilidad del proyecto.

A pesar de todos los factores positivos a favor de este esfuerzo de integración, el resultado de las encuestas realizadas a diferentes expertos en *Mine to Mill* a nivel mundial, de 10 proyectos *Mine to Mill* reportados, solo 2 son sostenibles al largo plazo. Del mismo modo, los resultados de la encuesta también nos dicen que la principal causa de este resultado es la dificultad al integrar la gestión.

De acuerdo al resultado del análisis de los casos de estudio se puede obtener incrementos de tonelaje de hasta el 15% y ahorros de energía hasta de 18% en promedio. Asimismo, en el análisis económico se analizaron los costos y beneficios de dos casos de estudio, Cerro Corona y Candelaria, obteniéndose ganancias de entre 56 y 8 MUS\$ al año respectivamente, lo cual refuerza el positivo impacto económico que tiene el *Mine to Mill*.

A pesar de ser muy atractivo, *Mine to Mill* enfrenta numerosos problemas. Los problemas que se dan a nivel organizacional fueron identificados por medio de las encuestas. Se encuestaron a 16 personas, de las cuales 9 proveedores y 7 operadores. De acuerdo a ellos, el principal problema organizacional es la falta de apoyo de la gerencia general que se deriva en una gran dificultad para que la filosofía del trabajo integrado llegue a todos los niveles de la organización. Otro problema identificado fue la práctica de definir indicadores de desempeño independientes para gerencias que son mutuamente dependientes, lo cual obstaculiza la integración y fomenta la búsqueda individual de alcanzar sus propios indicadores sin preocuparse de los de las otras áreas.

En cuanto a los factores técnicos que afectan la sostenibilidad del *Mine to Mill*, se identificaron dos, los factores geotécnicos y la variabilidad del mineral en la vida de la mina. Se proponen soluciones para estos temas siendo las más inmediatas, la definición de indicadores mixtos que representen el desempeño conjunto de todo el proceso de conminución y no de sus partes y realizar mejores estudios geotécnicos para que la operación no tienda a ser muy conservadora en el uso de explosivos.

La integración de la mina y la planta por medio de un *Mine to Mill* es positiva y va a traer beneficios para la empresa siempre que sea liderado por los gerentes de más alto nivel para que este mensaje de trabajo integrado, como una filosofía empresarial, llegue a todos los niveles de la organización. Se debe mirar al futuro del *Mine to Mill* en esa dirección.

Mine to Mill is an integration strategy between plant and mine whose one of its main ideas is to increase the usage of explosive in blasting to diminish the consumption of electric energy or increase the throughput in plant. This is a concept that seems to be very simple but in practice, its implementation is very complex.

In this work, we analyze the benefits that have been demonstrated in Mine to Mill and alike the challenges to be overcome. To this end, we have used three sources, firstly, the analysis and synthesis of previous research work with empirical basis submitted in world congresses. Secondly, the results of a survey to people related to implementation of Mine to Mill in the world, both managers of mining companies and expert consultants in its implementation. Thirdly, we performed an economic analysis of two Mine to Mill cases where the profitability of the project is evident.

Despite all the positive factors in favor of the effort of integration, the result of the survey conducted with different experts in Mine to Mill says that from ten projects only two are sustainable in long term. Likewise, results of survey also say that the main reason is the difficulty to integrate management.

According the results of the analysis of the cases it is possible to attain increments in throughput up to 15% and energy savings up to 18% in average. On the other hand, in the economic analysis two cases were studied, Cerro Corona and Candelaria, obtaining profits of 56 and 8 MUS\$ respectively, which reinforce the positive impact that Mine to Mill delivers. Even when Mine to Mill is very attractive, it faces various problems. Problems that are at organizational level were identified by the surveys. Sixteen people were surveyed, nine consultants and seven operators. According to them, the main problem is the lack of support of

the General Management so it makes hard that the philosophy of integrated job reaches all levels of the organization. Another problem identified was the practice of defining performance indicators that are independents for managers who are mutually dependent, which hinder the integration and encourage individual searching for reaching its own indicators no matter the indicators of other areas. viii

Regarding the technical factors affecting sustainability of Mine to Mill, two were identified, geotechnical factors and variability of the ore during life of mine. It has been proposed solutions of which the most immediate are the definition of indicators related to the whole process of comminution and not to its parts and performing better geotechnical studies so operation does not tend to be too conservative in the use of explosives.

Integration between mina and plant through a Mine to Mill project is positive and it is going to bring benefits to the company provided that always be led by the highest-level managers so the message of integrated work, as a philosophy, reaches all levels of organization. We need look the future of Mine to Mill in that direction.

## Tabla de Contenidos

ix

|   |     |
|---|-----|
| Resumen Ejecutivo .....   | v   |
| Abstract .....  | vii |
| Capítulo 1 Introducción .....   | 1   |
| 1.1. Justificación del tema “Beneficios y Desafíos de la Gestión Integrada Mina -Planta” .. | 1   |
| 1.2. Objetivos Generales y Específicos.....   | 3   |
| 1.3. Preguntas de Investigación .....   | 3   |
| 1.4. Modelo Conceptual y Definiciones .....   | 4   |
| 1.5. Diseño Metodológico.....   | 6   |
| Capítulo 2 Operaciones unitarias en mina y planta .....                                     | 9   |
| 2.1. Perforación.....   | 10  |
| 2.2. Voladura.....  | 11  |
| 2.3. Carguío y Transporte .....   | 12  |
| 2.4. Chancado.....  | 13  |
| 2.5. Molienda .....   | 15  |
| 2.6. Flotación .....  | 17  |
| 2.7. Recuperación de agua .....   | 18  |
| Capítulo 3 Gestión de la energía en las unidades mineras.....                               | 20  |
| 3.1. Distribución de la energía en unidades mineras .....                                   | 20  |
| 3.2. Consumo energético en mina y planta.....   | 21  |
| 3.3. Proveedores de energía en el mercado peruano.....                                      | 23  |
| 3.4. Costo de la energía eléctrica .....  | 24  |
| Capítulo 4 Estrategias de gestión mixta mina y planta .....                                 | 26  |
| 4.1. Historia.....  | 26  |
| 4.2. Cronología del <i>Mine to Mill</i> .....   | 27  |
| 4.3. Aplicaciones del <i>Mine to Mill</i> .....   | 28  |
| 4.4. Beneficios del <i>Mine to Mill</i> .....   | 28  |
| 4.5. Factores organizacionales que afectan el <i>Mine to Mill</i> .....                     | 29  |
| Capítulo 5 Descripción de los casos del <i>Benchmarking Mine to Mill</i> .....              | 30  |
| 5.1. Caso de estudio 1: Paddington Gold.....  | 32  |
| 5.2. Caso de estudio 2: División Andina de Codelco .....                                    | 32  |
| 5.3. Caso de estudio 3: Newmont Ahafo .....   | 33  |
| 5.4. Caso de estudio 4: Gold Fields Cerro Corona .....                                      | 34  |
| 5.5. Caso de estudio 5: Southern Perú Cuajone .....   | 35  |
| 5.6. Caso de estudio 6: Compañía Minera Antamina .....                                      | 36  |
| 5.7. Caso de estudio 7: Ban Houayxai Mine.....  | 37  |
| 5.8. Caso de estudio 8: Porgera Gold Mine .....   | 38  |
| 5.9. Caso de estudio 9: Kalgoorlie .....  | 39  |
| 5.10. Caso de estudio 10: Red Dog.....  | 40  |
| 5.11. Caso de estudio 11: Sandsloot Mine.....   | 41  |
| 5.12. Caso de estudio 12: Gol-e-Gohar Mine .....  | 41  |
| 5.13. Caso de estudio 13: Salobo Mine.....  | 42  |
| 5.14. Caso de estudio 14: Candelaria Mine .....   | 43  |
| 5.15. Caso de estudio 15: Cadia Hill Mine .....   | 44  |
| Capítulo 6 Análisis de resultados de los casos <i>Mine to Mill</i> .....                    | 46  |
| 6.1. Análisis de casos <i>Mine to Mill</i> – Mina.....                                      | 46  |

|  |  |     |
|--|--|-----|
| 6.2.   | Análisis de casos <i>Mine to Mill</i> – Planta .....                                   | 50x |
| Capítulo 7   | Evaluación económica de dos casos .....  | 56  |
| 7.1.   | Caso Cerro Corona.....   | 56  |
| 7.2.   | Caso Candelaria .....  | 59  |
| Capítulo 8   | Análisis de las variables organizativas mediante encuestas.....                        | 62  |
| 8.1.   | Encuesta <i>Mine to Mill</i> – Operadores.....   | 62  |
| 8.1.1.   | Información general .....  | 63  |
| 8.1.2.   | Beneficios obtenidos.....  | 64  |
| 8.1.3.   | Factores organizacionales .....  | 64  |
| 8.1.4.   | Continuidad del proyecto.....  | 66  |
| 8.1.5.   | Factores técnicos.....   | 66  |
| 8.1.6.   | Otras consideraciones .....  | 69  |
| 8.2.   | Encuesta <i>Mine to Mill</i> – Proveedores .....                                       | 70  |
| 8.2.1.   | Información general.....   | 71  |
| 8.2.2.   | Beneficios obtenidos.....  | 72  |
| 8.2.3.   | Sostenimiento o continuidad.....   | 75  |
| 8.2.4.   | Factores críticos de éxito .....   | 77  |
| 8.2.5.   | Factores organizacionales .....  | 79  |
| 8.2.6.   | Factores técnicos.....   | 83  |
| 8.2.7.   | Otras consideraciones .....  | 89  |
| Capítulo 9   | Resultados de las variables técnicas y organizacionales que afectan la ejecución ..... | 92  |
| 9.1.   | Factores técnicos.....   | 92  |
| 9.2.   | Factores organizacionales .....  | 95  |
| 9.3.   | Otros hallazgos.....   | 97  |
| Capítulo 10  | Conclusiones y Recomendaciones .....   | 98  |
| Referencias Bibliográficas                         | .....  | 103 |
| Apéndice 1.  | Encuesta de <i>Mine to Mill</i> – Proveedores.....                                     | 106 |
| Apéndice 2.  | Encuesta de <i>Mine to Mill</i> – Operadores .....                                     | 111 |
| Apéndice 3.  | Paddington Gold Operations .....   | 115 |
| Apéndice 4.  | División Andina de Codelco.....  | 116 |
| Apéndice 5.  | Newmont Ahafo Operation .....  | 117 |
| Apéndice 6.  | Operación Cerro Corona de Gold Fields .....  | 118 |
| Apéndice 7.  | Operación Cuajone de Southern Perú.....  | 119 |
| Apéndice 8.  | Compañía Minera Antamina .....   | 120 |
| Apéndice 9.  | Ban Houayxai Mine.....   | 121 |
| Apéndice 10.                                       | Porgera Gold Mine .....  | 122 |
| Apéndice 11.                                       | Kalgoorlie .....   | 123 |
| Apéndice 12.                                       | Red Dog Operation.....   | 124 |
| Apéndice 13.                                       | Sandsloot Mine .....   | 125 |
| Apéndice 14.                                       | Gol-e-Gohar Mine .....   | 126 |
| Apéndice 15.                                       | Salobo Mine.....   | 127 |
| Apéndice 16.                                       | Candelaria Mine .....  | 128 |
| Apéndice 17.                                       | Cadia Hill Mine .....  | 129 |
| Apéndice 18.                                       | Resultados de las encuestas .....  | 130 |
| Encuesta de <i>Mine to Mill</i> – Operadores.....  |  | 130 |
| Encuesta de <i>Mine to Mill</i> – Proveedores..... |  | 137 |

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Variables que impactan en el resultado Mine to Mill.....                            | 4  |
| Tabla 2. Costo de operación unitario de procesos de conminución.....                         | 21 |
| Tabla 3. Energía relativa y costo de voladura.....   | 21 |
| Tabla 4. Cálculos de energía y costos por unidad de operación.....                           | 22 |
| Tabla 5. Descripción de los casos analizados.....  | 31 |
| Tabla 6. Resultados Paddington Gold.....   | 32 |
| Tabla 7. Resultados División Andina de Codelco.....  | 33 |
| Tabla 8. Resultados Newmont Ahafo.....   | 34 |
| Tabla 9. Resultados Gold Fields Cerro Corona.....  | 35 |
| Tabla 10. Resultados Southern Perú Cuajone.....  | 36 |
| Tabla 11. Resultados Compañía Minera Antamina.....   | 37 |
| Tabla 12. Resultados Ban Houayxai Mine.....  | 38 |
| Tabla 13. Resultados Porguera Gold Mine.....   | 39 |
| Tabla 14. Resultados Kalgoorlie.....   | 40 |
| Tabla 15. Resultados Red Dog Operation.....  | 40 |
| Tabla 16. Resultados Sandsloot Mine.....   | 41 |
| Tabla 17. Resultados Gol-e-Gohar Mine.....   | 42 |
| Tabla 18. Resultados Salobo Mine.....  | 43 |
| Tabla 19. Resultados Candelaria Mine.....  | 44 |
| Tabla 20. Resultados Cadia Hill.....   | 45 |
| Tabla 21. Parámetros de voladura antes de la optimización.....                               | 48 |
| Tabla 22. Parámetros de voladura después de la optimización.....                             | 49 |
| Tabla 23. Datos operativos de molienda antes y después de la optimización.....               | 50 |
| Tabla 24. Cálculo del tonelaje adicional por año.....  | 56 |
| Tabla 25. Cálculo del adicional de cobre y oro fino por año.....                             | 57 |
| Tabla 26. Cálculo de los descuentos.....   | 57 |
| Tabla 27. Cálculo del beneficio anual por incremento de tonelaje.....                        | 57 |
| Tabla 28. Cálculo del beneficio anual por ahorro de energía.....                             | 58 |
| Tabla 29. Cálculo del incremento del costo en la mina.....                                   | 58 |
| Tabla 30. Cálculo de la ganancia global.....   | 58 |
| Tabla 31. Cálculo del tonelaje adicional por año.....  | 59 |
| Tabla 32. Cálculo del adicional de cobre fino por año.....                                   | 59 |
| Tabla 33. Cálculo de los descuentos.....   | 60 |
| Tabla 34. Cálculo del beneficio anual por incremento de tonelaje.....                        | 60 |
| Tabla 35. Cálculo del incremento del costo en la mina.....                                   | 60 |
| Tabla 36. Cálculo de la ganancia global.....   | 61 |
| Tabla 37. Resultados encuesta a operadores pregunta 6.....                                   | 64 |
| Tabla 38. Resultados encuesta a operadores pregunta 7 (factores organizacionales).....       | 65 |
| Tabla 39. Resultados encuesta a operadores pregunta 14 (participación de dos gerencias)..... | 66 |
| Tabla 40. Resultados encuesta a operadores pregunta 9 (continuidad del proyecto).....        | 66 |
| Tabla 41. Resultados encuesta a operadores pregunta 10 (Riesgo en voladura).....             | 67 |
| Tabla 42. Resultados encuesta a operadores pregunta 11 (dureza).....                         | 68 |
| Tabla 43. Resultados encuesta a operadores pregunta 12 (fragmentación).....                  | 68 |
| Tabla 44. Resultados encuesta a operadores pregunta 13 (cantidad de explosivos).....         | 69 |

|   |    |
|---|----|
| Tabla 45. Resultados encuesta a operadores pregunta 15.....                                   | 69 |
| Tabla 46. Resultados encuesta a proveedores pregunta 7 (beneficios).....                      | 73 |
| Tabla 47. Resultados encuesta a proveedores pregunta 8 (sostenimiento o continuidad).....     | 75 |
| Tabla 48. Resultados encuesta a proveedores pregunta 9.....                                   | 79 |
| Tabla 49. Resultados encuesta a proveedores pregunta 10.....                                  | 81 |
| Tabla 50. Resultados encuesta a proveedores pregunta 12 (participación de dos gerencias)..... | 82 |
| Tabla 51. Resultados encuesta a proveedores pregunta 11 (riesgos en voladura).....            | 84 |
| Tabla 52. Resultados encuesta a proveedores pregunta 24 (efecto de la dureza).....            | 88 |
| Tabla 53. Resultados encuesta a proveedores pregunta 25 (fragmentación).....                  | 89 |
| Tabla 54. Resultados encuesta a proveedores pregunta 26 (mayor cantidad de explosivos). ..... | 89 |

## Lista de figuras

xiii

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Operaciones unitarias mina. ....  | 9  |
| Figura 2. Operaciones unitarias planta.....   | 10 |
| Figura 3. Perforación hidráulica. ....  | 11 |
| Figura 4. Voladura en la minería. ....  | 12 |
| Figura 5. Camiones y palas. ....  | 13 |
| Figura 6. Chancadora giratoria. ....  | 15 |
| Figura 7. Molino SAG. ....  | 17 |
| Figura 8. Celdas de flotación industriales.....   | 18 |
| Figura 9. Presa de relaves. ....  | 19 |
| Figura 10. Distribución de consumo de energía. ....   | 20 |
| Figura 11. Distribución de consumo de energía en mina.....                                  | 22 |
| Figura 12. Distribución de consumo de energía en planta.....                                | 23 |
| Figura 13. Estructura de producción por empresas generadoras 2017. ....                     | 24 |
| Figura 14. Tarifas de energía eléctrica para la industria (centavos de dólar por kwh). .... | 25 |
| Figura 15. Cronología del Mine to Mill.....   | 27 |
| Figura 16. Incremento en el tonelaje.....   | 51 |
| Figura 17. Frecuencia del incremento en el tonelaje. ....                                   | 52 |
| Figura 18. Correlación entre el factor de potencia y tonelaje. ....                         | 53 |
| Figura 19. Porcentaje de descenso del ratio de consumo de energía. ....                     | 54 |
| Figura 20. Frecuencia del porcentaje de descenso del ratio de energía. ....                 | 54 |
| Figura 21. Correlación entre el factor de potencia y descenso de energía.....               | 55 |

## Capítulo 1

### Introducción

Este trabajo de investigación tiene como finalidad estudiar los beneficios y desafíos que se tiene en la implementación de la estrategia de integración mina-planta, conocidas como *Mine to Mill*. Para el estudio se han usado tres fuentes de información; la primera fuente son 15 artículos publicados en diferentes congresos a nivel mundial sobre experiencias de *Mine to Mill*. Esta data fue recolectada y analizada para llegar a conclusiones sobre los resultados de la implementación del *Mine to Mill*.

La segunda fuente de información que se usó fue una encuesta realizada a 16 especialistas entre operadores, proveedores y consultores relacionados al tema de implementar proyectos *Mine to Mill*. De esta encuesta se obtuvo información a partir de la experiencia de ejecutivos de empresas que han implementado o han sido proveedores del servicio de implementación de *Mine to Mill*. Dado que el *Mine to Mill* tiene fuertes componentes organizacionales y técnicos, se recogió información sobre ambos aspectos en el momento de su implementación. Se analizaron los problemas técnicos y organizacionales reportados en la encuesta.

Finalmente, se realizó un análisis económico de costo-beneficio de implementar el *Mine to Mill* en dos casos específicos, minas Cerro Corona y Candelaria.

#### **1.1. Justificación del tema “Beneficios y Desafíos de la Gestión Integrada Mina - Planta”**

Dada la volatilidad del precio de los metales, las operaciones mineras necesitan ser cada vez más eficientes y ser más competitivas respecto a sus costos operativos. Uno

de los principales rubros de costos en una unidad minera es la energía utilizada en la reducción de tamaño del mineral, desde el tamaño *ROM*<sup>1</sup> hasta el de liberación de flotación. Esta reducción se realiza en dos etapas, en la mina mediante uso de explosivos y en la planta concentradora mediante el uso de energía eléctrica en las operaciones de chancado y molienda. Como afirma Workman y Eloranta (2003), la reducción de tamaño por voladura es mucho más económica que la realizada en planta, pero presenta limitaciones geotécnicas y de otro tipo técnico que hacen que tenga un límite en su aplicación. Del correcto balance entre el uso de explosivos y energía eléctrica depende que se tenga una operación con un costo de energía optimizado. Para esto es necesario la implementación de una estrategia de gestión integrada que vea la operación de una manera holística.

Esta es la principal idea en la estrategia llamada *Mine to Mill*. Siendo algo tan simple como idea, sin embargo, en la práctica es bastante difícil de lograr por diferentes motivos, tanto técnicos como organizacionales. En la literatura no se cuenta con información ordenada de los beneficios que se tiene en la implementación de esta estrategia ni de los problemas organizativos que ésta presenta. La realización de este estudio se justifica para brindar información de lo rentable que puede ser trabajar una gestión mixta y de los problemas que en la práctica se presentan.

---

<sup>1</sup> *ROM* (*run of mine*), mineral en el estado que sale de la mina hacia planta.

## **1.2.Objetivos Generales y Específicos**

### **Objetivo General**

El objetivo general del trabajo de investigación es identificar los beneficios y los problemas de la implementación del *Mine to Mill* para integrar las operaciones unitarias mina-planta y su sostenimiento en el largo plazo.

### **Objetivos Específicos**

Se tienen cinco objetivos específicos:

- a. Describir el consumo de energía en la conminución y su impacto en los resultados económicos finales.
- b. Describir la estrategia de gestión mixta de las operaciones unitarias mina y planta: *Mine to Mill*.
- c. Identificar los beneficios obtenidos en casos específicos que implementaron estrategias *Mine to Mill* en mina, planta y en los resultados económicos de la mina.
- d. Definir los principales factores técnicos que afectan la ejecución exitosa de la estrategia *Mine to Mill*.
- e. Definir los principales factores organizacionales que afectan la ejecución exitosa de la estrategia *Mine to Mill*.

## **1.3.Preguntas de Investigación**

- a. ¿Cuál es la etapa de mayor consumo de energía en una operación minera y como se debe de optimizar?

- b. ¿En qué consiste la estrategia de gestión mixta mina-planta y que beneficios ofrece referente al tonelaje procesado?
- c. ¿Por qué tiene éxito o fracasa un *Mine to Mill* en el largo plazo?
- d. ¿Qué variables técnicas ejercen más influencia en la implementación del *Mine to Mill*?
- e. ¿Qué variables organizacionales son las que tienen efecto en la implementación del *Mine to Mill*?

#### 1.4. Modelo Conceptual y Definiciones

Se analizó el impacto que tienen las variables técnicas y las variables organizacionales en los beneficios obtenidos por la implementación de *Mine to Mill*. Estas variables preliminares surgieron a lo largo de la formulación del problema, en particular a partir de la experiencia de los miembros del grupo y de las entrevistas en profundidad que se hicieron en la etapa de formulación.

*Tabla 1. Variables que impactan en el resultado Mine to Mill*

| <i>Variables Técnicas</i>                | <i>Variables Organizacionales</i>                                |
|--|--|
| Estabilidad geotécnica                   | Liderazgo integrador de alta dirección                           |
| Tecnología de conminución                | Inercia al cambio  |
| Tipo de yacimiento                       | Estructura organizacional que facilite la comunicación           |
| Variabilidad del mineral                 | Capacidad de trabajo colaborativo (cultura organizacional)       |
| Tipo de mina (tajo abierto, subterránea) | Objetivos e indicadores de performance que faciliten la medición |

*Nota:* Elaboración propia.

El beneficio esperado es un mejor desempeño de la operación integrada que se refleja en dos resultados: el incremento en la producción y reducción del consumo de energía.

### **Variables Técnicas**

- a. Estabilidad geotécnica: Estabilidad de taludes y riesgo de derrumbes que pudieran ocurrir ante el incremento de la vibración en la voladura.
- b. Tecnología de conminución: El tipo de método de conminución que cuenta la planta. Puede ser *SAG*<sup>2</sup>, molienda de barras, molienda de bolas, o *HPGR*<sup>3</sup>. De acuerdo a ello se tendrá mayor o menor beneficio con el *Mine to Mill*.
- c. Tipo de yacimiento: La influencia del tipo de depósito: skarn, pórfido, epitermal. Esto se considera debido a que muchas veces el tipo de yacimiento determina la dureza de la roca.
- d. Variabilidad del mineral: La variabilidad en el tipo de mineral que se da en la vida de la mina debido a la heterogeneidad del yacimiento.
- e. Tipo de mina: Los tipos de mina a considerar en este estudio son dos: tajo abierto o subterráneo.

---

<sup>2</sup>*SAG (semi-autogenous grinding)*, es un equipo usado en plantas mineras para moler rocas y hacerlo apto para las etapas siguientes de procesamiento.

<sup>3</sup>*HPGR (High Pressure Grinding Rolls)*, son molinos de rodillos de alta presión en aplicaciones de minerales de alta dureza.

### **Variables Organizacionales**

- a. Liderazgo integrador de alta dirección: La existencia del involucramiento activo y compromiso de la gerencia general y su equipo de trabajo.
- b. Inercia al cambio: Resistencia de la organización a los cambios de diferentes tipos.
- c. Estructura organizacional: Contar con una estructura que facilite la comunicación (comités de coordinación, puestos de integración mina y planta) y una cultura organizacional que fomente el trabajo colaborativo.
- d. Capacidad de trabajar colaborativamente: Se evalúa si se ha desarrollado, dentro de la cultura organizacional, el pensamiento que la mina y la planta son una sola operación integrada, fomentando el trabajo colaborativo e integrado.
- e. Indicadores de performance que faciliten la medición: Se evalúa si las empresas han identificado un objetivo apropiado para el *Mine to Mill*, con indicadores que faciliten el control y actualización en el tiempo. Ello permite disponer de herramientas para medir los beneficios obtenidos.

### **1.5.Diseño Metodológico**

El presente trabajo de investigación es un estudio cualitativo que tomó a las empresas que implementaron *Mine to Mill* como unidad de análisis y que tiene tres componentes: la revisión de estudios publicados sobre experiencias de la estrategia de gestión mixta mina y planta, la cuantificación de beneficios de dos casos que implementó la estrategia *Mine to Mill* y el análisis de encuestas realizadas a gerentes y especialistas en la implementación de estrategias integradas mina-planta.

## **Análisis, revisión y síntesis de estudios publicados**

Una de las metodologías que se emplea en el presente trabajo de investigación es denominada meta síntesis. En esta se analiza información proveniente de estudios cualitativos previos. Es un proceso que le permite al investigador buscar, seleccionar, evaluar, resumir y combinar evidencia cualitativa para responder a preguntas de investigación y sacar conclusiones de dicha revisión (Erwin et al., 2011). Debido a que los estudios previos elegidos son casos de empresas que han aplicado *Mine to Mill* (estudios cualitativos), no se ha empleado el conocido meta análisis ya que ésta es una metodología de investigación que requiere usar como base estudios cuantitativos similares (Botero, y Gambará, 2016).

A continuación, se presentan los pasos seguidos para el análisis de estudios publicados sobre la implementación de *Mine to Mill* en empresas mineras del mundo.

- a. Búsqueda de estudios e investigaciones publicadas sobre el problema de implementar estrategias colaborativas o de gestión mixta entre mina-planta. Se revisó la información reportada sobre los costos importantes y los beneficios obtenidos, además de las características generales de las minas.
- b. Identificación de 15 casos publicados sobre aplicaciones de la estrategia de integración mina-planta, *Mine to Mill* que contaban con información sobre costos y beneficios.
- c. Análisis de los beneficios reportados en los 15 casos estudiados. Se investigó que beneficios obtuvieron y que factores técnicos y organizacionales intervinieron.

- d. Síntesis de los estudios revisados para sacar conclusiones sobre el impacto de la implementación del *Mine to Mill* en las empresas revisadas.

#### **Análisis económico de los costos y beneficios**

- a. Se realizó el análisis económico de los costos y beneficios de dos empresas mineras que implementaron el *Mine to Mill*.

#### **Análisis de encuestas**

- a. Diseño y envío de 30 encuestas a dos tipos de informantes, 15 a las empresas mineras y 15 a proveedores de sistemas *Mine to Mill*.
- b. Análisis de los factores técnicos y organizacionales reportados.

#### **Síntesis de resultados**

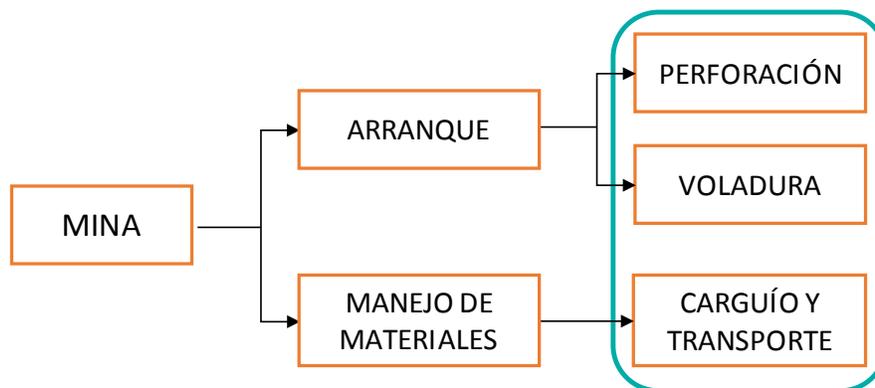
- a. En el capítulo final de conclusiones y recomendaciones se integraron los resultados obtenidos tanto en los estudios previos, como en el análisis de costos y beneficios y en el análisis de las encuestas.

## Capítulo 2

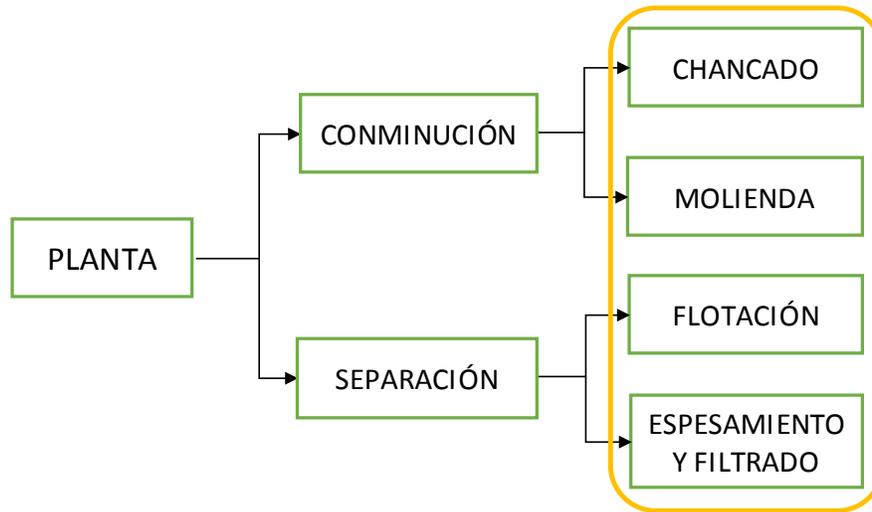
### Operaciones unitarias en mina y planta

A fin de contextualizar la estrategia de integración entre mina y planta, en el presente capítulo se describen las principales operaciones unitarias involucradas tanto en la mina como en la planta.

Las actividades de producción minera pueden ser separadas en operaciones unitarias independientes que realizadas en cierta secuencia permiten la explotación y el desarrollo de un depósito. Las operaciones unitarias en mina y planta se presentan en la figura 1 y figura 2 respectivamente.



*Figura 1.* Operaciones unitarias mina.  
Fuente: Elaboración propia.



*Figura 2.* Operaciones unitarias planta.  
Fuente: Elaboración propia.

## 2.1.Perforación

Esta operación es la que da inicio al proceso productivo en una faena minera. En la mayoría de los casos, se realiza esta actividad perforando huecos cilíndricos en la roca para insertar y detonar material explosivo con la finalidad de fragmentar y separar los minerales desde la corteza terrestre. Para crear un orificio en una roca es necesario aplicar energía la cual es suministrada por una perforadora. Las perforadoras pueden ser de acuerdo al tipo de energía: hidráulicas, neumáticas y eléctricas.

El resultado de la perforación es lo que se llama malla de perforación, la cual consiste en huecos con ciertas medidas y distanciamiento calculados en base a las características de la roca y del producto que se desea obtener.



Figura 3. Perforación hidráulica.

Fuente: Recuperado de <https://www.goldfields.com.pe/operaciones.html>.

## 2.2. Voladura

El primer proceso de conminución que se aplica al material es la voladura, por lo que su éxito permitirá realizar un buen manejo de este material por parte de los procesos posteriores (chancado, por ejemplo). El proceso de voladura consiste en cargar con explosivos los pozos generados en la perforación con el objetivo de fragmentar la roca a tamaños manejables por los equipos mineros. La fragmentación de rocas requiere de aplicación de energía, la cual se obtiene por medio de la explosión de un elemento explosivo inserto en el macizo rocoso. La voladura se realiza con el uso de explosivos, la mayoría de ellos están basados en el ANFO<sup>4</sup> y otros preparados químicos. Para generar la explosión se usa dispositivos eléctricos llamados detonadores.

---

<sup>4</sup> ANFO (*ammonium nitrate and fuel oil*), es un explosivo de alta potencia.

La granulometría final obtenida dependerá de las características de la roca y de la energía aplicada sobre ella, por lo que si deseamos una granulometría fina debemos utilizar mayor cantidad de recursos (explosivos) o aumentar su potencia. El producto de la voladura es el mineral fragmentado que es transportado a planta.



*Figura 4.* Voladura en la minería.

Fuente: Recuperado de <http://www.construccionminera.cl/tronadura-en-la-mineria-avances-en-explosivos>.

### **2.3.Carguío y Transporte**

Las etapas de carguío y transporte suponen la ejecución conjunta de cargar, con equipos de gran tamaño, el material en el sistema de transporte de la faena y transportarlo al lugar de destino correspondiente. Dependiendo de la calidad del mineral, las siguientes etapas pueden ser: chancado (en el caso del mineral por encima de la ley de corte), lixiviación (en caso de sulfuros de baja ley) o a botaderos (en caso de ser considerado material estéril). Este es el proceso de mayor costo debido a que cuenta con la mayor cantidad de equipos involucrados (flota), alto grado de mecanización, menor rendimiento

productivo por equipo y constituye un proceso de operación prácticamente continuo. Como afirman Workman y Eloranta (2003), en promedio los costos de estas operaciones representan alrededor de 45% del costo de la mina, por lo que es de gran importancia garantizar un ambiente de operación apto para lograr los mejores rendimientos de los equipos involucrados.

El carguío se realiza utilizando palas y camiones mineros de gran tamaño; las principales marcas de camiones son Caterpillar, Komatsu y en Palas Bucyrus. Los camiones usan de combustible el diésel, las palas pueden ser a diésel o eléctricas.



*Figura 5.* Camiones y palas.

Fuente: Recuperado de <https://www.ferreyros.com.pe/novedades/noticias/camiones-y-palas-gigantes-caterpillar-en-peru-alcanzan-record-mundial>

## **2.4.Chancado**

En el esquema general del proceso, todo mineral derivado de la explotación a cielo abierto debe ser reducido en una planta de trituración (chancado) para conseguir una granulometría adecuada que permita la liberación y concentración en forma eficiente.

Como todos los procesos de conminución, el chancado requiere de un elevado consumo energético, lo cual tiene gran impacto económico en el desarrollo de un proyecto de explotación minera. La selección del tipo y tamaño del equipo de chancado depende principalmente de las características físicas y geológicas del material de mina (volumen y tonelaje, tamaños de alimentación y salida, dureza, tenacidad, abrasividad, humedad de la roca, etc.) y de las necesidades granulométricas de la siguiente operación productiva. El chancado en procesamiento de minerales se realiza en vía seca.

Las operaciones de chancado son tres: primario, secundario y terciario. El chancado primario se lleva a efecto básicamente en dos tipos distintos de chancadoras: de mandíbula y giratorio, cada uno con sus propias características de operación y con la capacidad de admitir el tamaño máximo de la roca proveniente de la mina.

El chancado secundario se alimenta del producto del chancado primario que anda en el orden de las 4 a 6 pulg. Su producto típicamente oscila de 1 a 1 ½ pulg. Se realiza en las llamadas chancadoras de cono, tipo MP de Metso, Raptor de FLSmidth, entre otras.

El producto del chancado secundario alimenta al chancado terciario que se realiza también en equipos similares. Su producto oscila en los 12 mm. Los circuitos de chancado pueden tener etapas de clasificación y de acuerdo a la colocación de los tamices pueden ser circuitos cerrados y abiertos.

En los últimos años se está dando la introducción de la tecnología *HPGR* como una etapa que reemplaza al chancado terciario o incluso como chancado cuaternario. Para

chancado de *pebbles*<sup>5</sup> en operaciones con molienda SAG también se utilizan los mismos equipos.

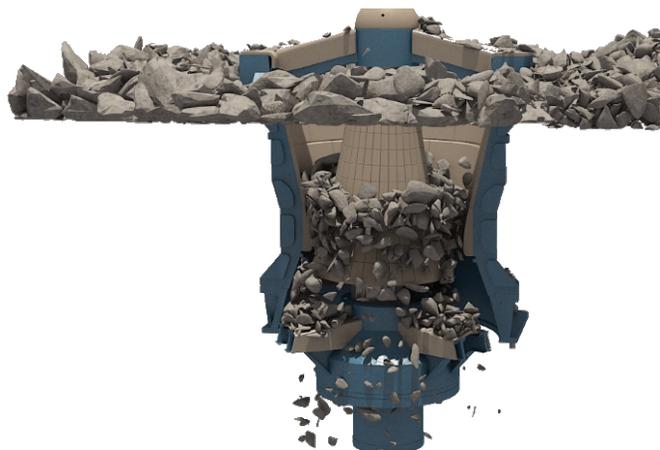


Figura 6. Chancadora giratoria.

Fuente: Recuperado de <https://www.911metallurgist.com/metallurgia/ingenieria>.

## 2.5.Molienda

La molienda es la última etapa en un proceso de reducción de tamaños. En esta etapa las partículas son reducidas de tamaño por una combinación de impacto y abrasión en vía húmeda. El objetivo de esta operación unitaria es reducir el tamaño del mineral para liberar las partículas del mineral de la ganga. La separación entre partículas que contienen el mineral y el resto, ocurre en la etapa siguiente a la molienda; la flotación.

La importancia de esta operación queda demostrada por el hecho de que gran parte de la energía gastada en el procesamiento de un mineral es utilizada en la molienda. En consecuencia, esta parte del proceso es de fundamental incidencia en el costo del

---

<sup>5</sup> *Pebbles* (palabra en inglés que significa guijarros, trozos o piedras pequeñas), Se trata de un material duro y difícil de ser reducido a menor tamaño en el molino semi-autógeno.

producto. Cualquier mejora en la eficiencia de esta operación se reflejará como una importante economía en el proceso. En la molienda se reducen partículas de tamaño entre 12 mm a partículas de entre 180 a 300  $\mu\text{m}$ .

La molienda puede ser Convencional o molienda Semi-Autógena *SAG*. Se entiende por molienda convencional el uso de molinos de barras como primarias y molinos de bolas como secundaria o más recientemente el uso de molinos unitarios de gran tamaño. En el caso de los molinos unitarios de gran tamaño, trabajan normalmente con una etapa de clasificación posterior a la molienda en lo que se llama el circuito cerrado directo. El producto de clasificación de hidrociclones va a la siguiente etapa de flotación. Los molinos de bolas usan bolas de acero para la molienda. Existe otro diseño de circuito llamado circuito cerrado inverso en el cual el alimento al molino de bolas es clasificado previo a su paso por el molino. Este es un caso típico cuando los molinos de bolas son la siguiente etapa de una molienda *SAG*.

En la molienda Semi-Autógena *SAG*, la acción de molienda viene dado por una carga de bolas, así como también por las mismas rocas de gran tamaño del mismo mineral alimentado. La molienda *SAG* se alimenta con producto de chancado primario.

Los molinos *SAG* se caracterizan por tener un gran diámetro en relación a su longitud y su operación conlleva a muchos cuidados adicionales que no se tienen en la molienda convencional. La molienda *SAG* es muy sensible a los cambios de tamaño de la alimentación.



Figura 7. Molino SAG.

Fuente: Recuperado de <https://www.911metallurgist.com/metalurgia/ingenieria>.

## 2.6. Flotación

En la etapa de flotación se realiza la separación del mineral valioso de la ganga. Se realizan en tanques agitados y aireados conocidos como celdas de flotación las cuales forman parte de los llamados circuitos de flotación. Estos constan normalmente de tres etapas: etapa *rougher*, etapa *scavenger* y etapa *cleaner*.

En la etapa *rougher* se trata de lograr la mayor recuperación posible sin poner mucha atención en el grado de concentrado.

La etapa *scavenger* o desbastadora se encarga de procesar los relaves de la etapa *rougher* y lograr la mayor recuperación posible a costa de un concentrado de muy baja ley. El concentrado de acuerdo a su ley podría ir a una etapa *cleaner* o retornar al alimento *rougher*. El concentrado *rougher* va directamente a las etapas de limpieza.

En las etapas *cleaner* o de limpieza se trata de obtener el mejor grado posible de concentrado. De acuerdo al diseño del circuito pueden ser de dos a cuatro etapas de limpieza.

El relave *scavenger* consiste en el relave final y sale del circuito. El concentrado de limpiezas va a una etapa de espesamiento y filtración y constituye el producto final.



Figura 8. Celdas de flotación industriales.

Fuente: Recuperado de <https://www.goldfields.com.pe/operaciones.html>.

## 2.7. Recuperación de agua

El manejo de relaves consiste en la recuperación de agua y en el depósito de los residuos sólidos. En la mayoría de operaciones, la primera etapa de recuperación de agua se da en la etapa de espesamiento, el cual se realiza en grandes tanques de sedimentación dinámica. El agua aquí recuperada se envía de nuevo al proceso. La descarga del espesador se envía a la presa de relaves donde de acuerdo al diseño se forma diques por medio de cicloneo. El agua de esta presa puede ser descartada como efluente o también retornar en un porcentaje a la planta.

En síntesis, las principales operaciones unitarias que se abordan en este estudio son la perforación y voladura por parte de mina y chancado y molienda por parte de planta.



*Figura 9.* Presa de relaves.

Fuente: Recuperado de <http://mapio.net/pic/p-103288995/>.

## Capítulo 3

### Gestión de la energía en las unidades mineras

Para comprender el impacto de la gestión integrada mina-planta se debe entender que la energía consumida en estas operaciones unitarias es un impulsor de costos muy importante que debe ser optimizado de forma integral.

#### 3.1. Distribución de la energía en unidades mineras

Cada etapa de las operaciones mina-planta tiene sus propios requerimientos de energía. Al examinar el consumo de energía en distintas unidades mineras se visualiza su distribución. Según Murr, et. al (2015), la molienda consume el 40% de la energía total, mientras que el chancado consume 4% para un consumo total de energía eléctrica del 44% en la etapa de conminución. Esto se compara con las operaciones unitarias de la mina en las cuales, la perforación consume 5% y la voladura el 2%, para un total de energía del 7%.

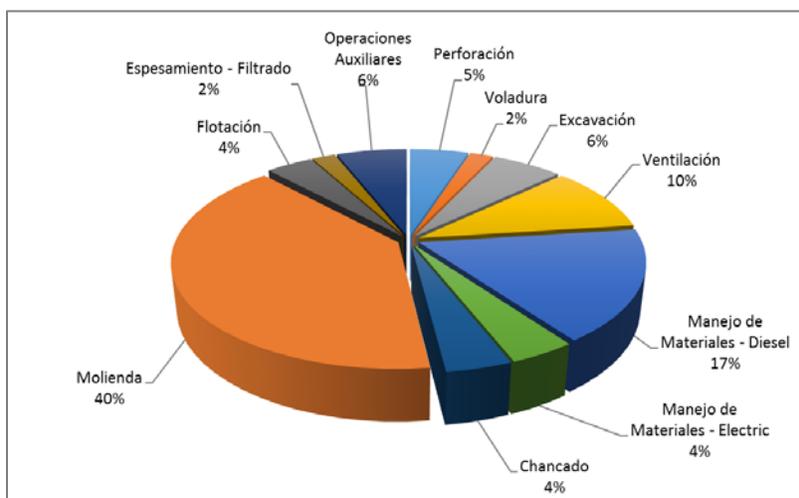


Figura 10. Distribución de consumo de energía.

Fuente: Adaptado de Murr, et. al (2015).

### 3.2. Consumo energético en mina y planta

Basado en los hallazgos de Scott, et. al (1999), Workman y Eloranta (2003) y Murr, et. al (2015) se hace un análisis de los consumos energéticos de mina y planta. Las tablas 2, 3 y 4 muestran tres fuentes de comparación de la relación que existe entre el consumo de energía de la voladura comparado con las etapas de chancado y molienda. En la tabla 3 se nota que la relación de la energía consumida en la voladura es 1/100 respecto a la consumida en la molienda. La relación entre el costo de la energía en voladura respecto al costo de la energía en molienda es de 1/8 de acuerdo a la tabla 2. Esto se puede calcular dividiendo el costo de la voladura entre el costo de la energía en molienda.

*Tabla 2.* Costo de operación unitario de procesos de conminución.

|          | <i>kWh/Lton</i> | <i>Factor</i> | <i>US\$/Lton</i> |
|----------|-----------------|---------------|------------------|
| Voladura | 0.43            | 2             | 0.160            |
| Chancado | 3.24            | 18            | 0.230            |
| Molienda | 17.82           | 100           | 1.250            |

*Nota:* Recuperado de “Blasting Influence on Comminution” (Murr, D., Workman, L., Eloranta, J., & Katsabanis, P., 2015).

*Tabla 3.* Energía relativa y costo de voladura.

|          | <i>kWh/ton</i> | <i>Factor</i> | <i>US\$/ton</i> |
|----------|----------------|---------------|-----------------|
| Voladura | 0.20           | 1             | 0.150           |
| Chancado | 2.00           | 10            | 0.750           |
| Molienda | 20.00          | 100           | 3.750           |

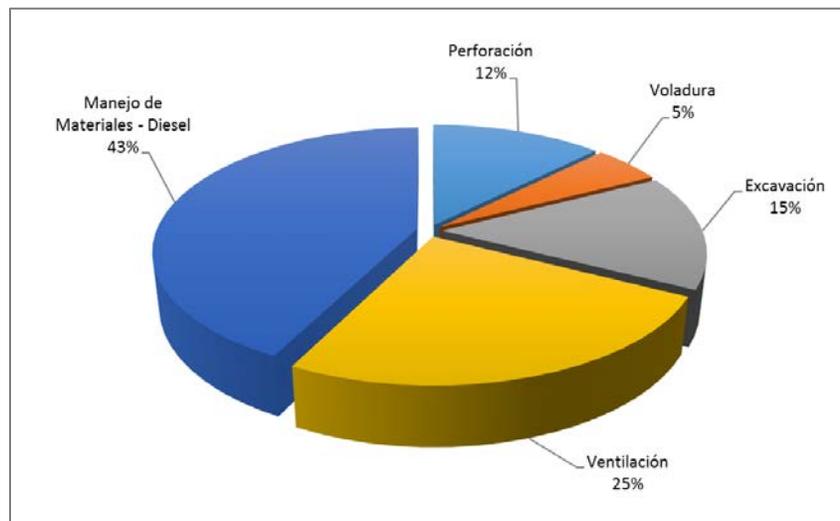
*Nota:* Recuperado de “Blasting for Mine to Mill Optimisation” (Scott, A., Kanchibotla, S., & Morrel, S., 1999).

*Tabla 4.* Cálculos de energía y costos por unidad de operación.

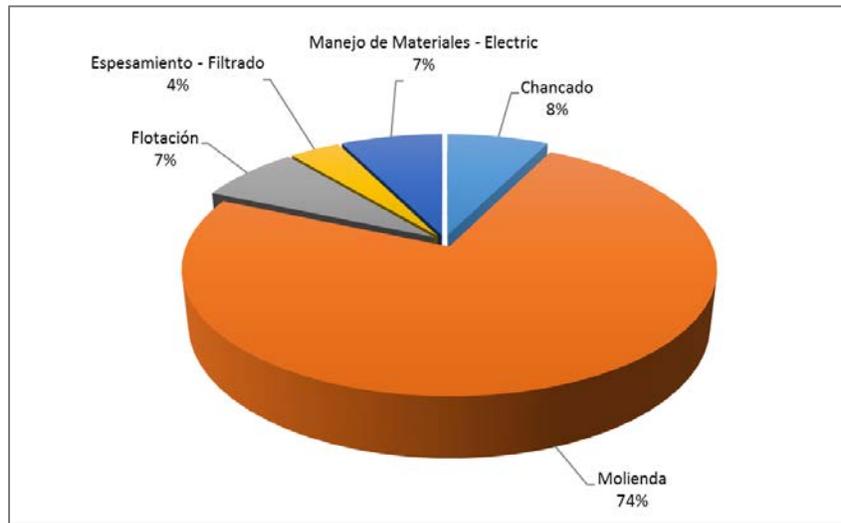
|               | <i>kWh/ton</i> | <i>Factor</i> | <i>US\$/ton</i> |
|---------------|----------------|---------------|-----------------|
| Explosivos    | 0.24           | 1             | 0.119           |
| Ch Primario   | 0.23           | 1             | 0.009           |
| Ch Secundario | 0.61           | 3             | 0.030           |
| Molienda      | 19.35          | 100           | 0.949           |

*Nota:* Recuperado de “The effects of Blasting on Crushing and Grinding Efficiency and Energy Consumption” (Workman, L., & Eloranta, J., 2003).

Las figuras 11 y 12, construidas a partir de los datos de la figura 10, muestran que la voladura representa aproximadamente un 5% del consumo de energía en la mina, mientras que la molienda representa el 74% del consumo energético en planta.



*Figura 11.* Distribución de consumo de energía en mina.  
Fuente: Elaboración propia.



*Figura 12.* Distribución de consumo de energía en planta.  
Fuente: Elaboración propia.

Esta distribución de energía nos muestra que para efectos de optimización hacer la voladura más intensiva resulta algo bastante atractivo y que, de lograrse mayores reducciones de tamaño en la voladura, se tendría mejor performance en etapas aguas abajo como la molienda.

### **3.3. Proveedores de energía en el mercado peruano**

Según el Reporte Estadístico Minero Energético 2017, la producción de las centrales que pertenecen a los grupos Engie, Enel Generación Perú y Electroperu, los más representativos del mercado, tuvieron una contribución de 14.8%, 11.2% y 13,2% respectivamente. La lista de empresas de menor tamaño agrupados como otros, tuvieron una participación de 36.7%.

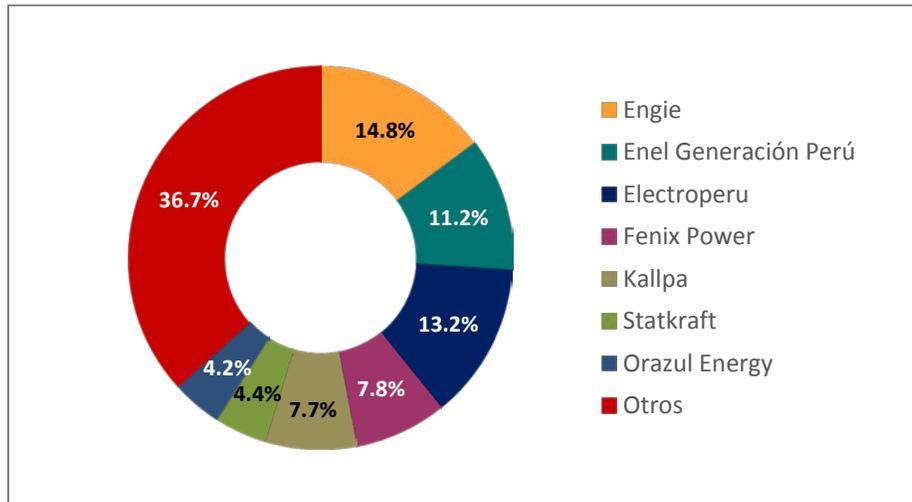


Figura 13. Estructura de producción por empresas generadoras 2017.

Fuente: Adaptado de Reporte Estadístico Mineroenergético, REM 2017.

### 3.4. Costo de la energía eléctrica

De acuerdo al Reporte Estadístico Minero Energético 2017, el Perú tiene unas de las tarifas eléctricas para la industria más baja de la región, después de Paraguay, Argentina y Ecuador. De esta forma, el costo de la energía para la industria en el Perú es de 8.8 centavos de dólar por kilovatio hora ( $\text{¢US\$/kWh}$ ), mientras que en Paraguay es de 5.1  $\text{¢US\$/kWh}$ , en Argentina es de 6.2  $\text{¢US\$/kWh}$  y en Ecuador es de 8.6  $\text{¢US\$/kWh}$ . El promedio del costo de electricidad para la industria en la región es 11  $\text{¢US\$/kWh}$ .

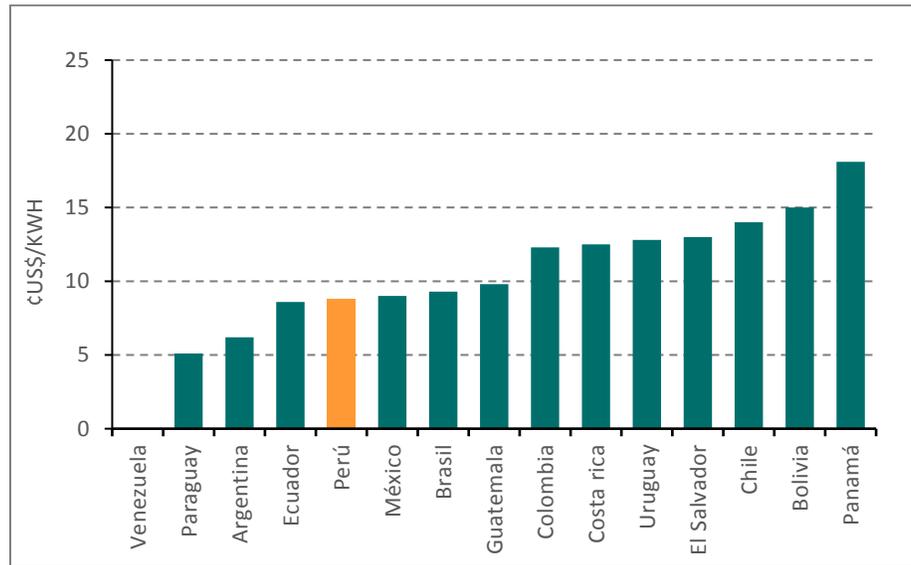


Figura 14. Tarifas de energía eléctrica para la industria (centavos de dólar por kwh).  
Fuente: Adaptado de Reporte Estadístico Minero Energético, REM 2017.

## Capítulo 4

### Estrategias de gestión mixta mina y planta

La estrategia de gestión mixta entre mina y planta que se analiza en el presente trabajo de investigación se le conoce con el nombre de *Mine to Mill*.

*Mine to Mill* es un método holístico para la optimización de las operaciones de minado y procesamiento cuyo objetivo es reducir el consumo de energía en los procesos de reducción de tamaño (McKee, D. J., 2013). Las mejoras que implica el *Mine to Mill* involucra a la cadena de reducción de tamaño desde las etapas de voladura en la mina hasta el producto final de la concentradora.

*Mine to Mill* trata de optimizar la energía aplicada en voladura mediante los explosivos para lograr una mejor eficiencia de energía eléctrica en las etapas de conminución (McKee, D. J., 2013). En principio, la energía eléctrica tiende a ser mucho más cara que la aplicada por medio de explosivos (Workman y Eloranta, 2003). Al aplicar mayor energía en voladura, el alimento a planta tiende a ser más fino lo cual permite, ya sea pasar mayor tonelaje o procesar el mismo tonelaje a un ratio de consumo de energía menor. Naturalmente, dependiendo de las tecnologías de molienda el beneficio puede ser mayor o menor.

#### 4.1.Historia

El *Mine to Mill* como una estrategia reconocida empezó a partir de los años 90 con los primeros trabajos realizados en Australia. En 1996 el proyecto llevado a cabo por

AMIRA<sup>6</sup>, (JKMRC, 2002) el cual incluyó trabajos de campo, colocó el *Mine to Mill* como una estrategia probada de optimización. El desarrollo logrado al día de hoy permite tener los datos logrados en *Mine to Mill* en los modelos de bloques y en el planeamiento minero.

#### 4.2. Cronología del *Mine to Mill*

De acuerdo a (McKee, 2013) el vínculo entre geología, minería y procesamiento viene siendo utilizado hace mucho tiempo en operaciones y esta visión ya es aceptada. Sin embargo, para comprender mejor la aplicación *Mine to Mill*, nos debemos centrar en las últimas dos décadas cuando las estrategias *Mine to Mill* han sido desarrolladas activamente. En la figura 15 se muestra una cronología de desarrollos significativos:



Figura 15. Cronología del *Mine to Mill*.  
Fuente: Adaptado de McKee (2013).

<sup>6</sup> AMIRA (Australian Mineral Industries Research Association), es una organización global independiente de compañías mineras y proveedoras, creada para desarrollar, intermediar, facilitar y administrar proyectos de investigación.

### 4.3. Aplicaciones del *Mine to Mill*

En forma general el *Mine to Mill* implica optimizar la mina para beneficio de toda la empresa. La reducción de energía no es la única aplicación de *Mine to Mill*, podemos considerar:

- a. Aumento de capacidad y reducción de consumo de energía en molienda: Es la aplicación más común mencionada anteriormente.
- b. Voladura controlada para reducir la cantidad de finos: Esto se da en aplicaciones en minas de carbón.
- c. *Blending*<sup>7</sup> para un mejor performance en planta: El *blending* en la mina se considera una aplicación de *Mine to Mill* dado que también involucra costos asumidos por mina.
- d. Voladura controlada para *heap leaching*<sup>8</sup>: Las planta de lixiviación presentan requerimientos de granulometrías diferentes los cuales deben diseñarse a partir de la voladura.
- e. Voladura controlada para fragmentación preferencial: Dependiendo del tipo de mineralización en algunos casos se puede requerir una voladura que fomente la fragmentación preferencial para obtener mejores resultados metalúrgicos.

### 4.4. Beneficios del *Mine to Mill*

El principal beneficio de la aplicación de una estrategia de *Mine to Mill* es la genuina integración entre la gestión de la mina y la planta y una mejor calidad de

---

<sup>7</sup> *Blending*, mezcla de mineral.

<sup>8</sup> *Heap leaching*, lixiviación en pilas.

caracterización del cuerpo mineralizado. El resultado de esto produce beneficios económicos.

Para el caso peruano, de los tres casos incluidos en la muestra, la mayor aplicación es en el incremento de tonelaje de molienda. Como veremos más adelante, los incrementos de tonelaje en el caso de la molienda SAG de acuerdo a estudios reportados llegan hasta 15% y las reducciones de ratios de energía hasta 18%.

#### **4.5. Factores organizacionales que afectan el *Mine to Mill***

Hay varios estudios que han analizado los factores organizacionales y su efecto en los resultados que obtiene la mina (Komljenovic, Loiselle, & Kumral, 2017) y en los resultados del *Mine to Mill* como McKee (2013) y Gallestey *et al* (2015). De acuerdo a ellos, el éxito de la integración depende de varios factores clave:

- a. Desarrollar el pensamiento que la mina y la planta son una sola operación integrada, fomentando como rasgo de la cultura organizacional el trabajo colaborativo e integrado.
- b. Identificar un objetivo apropiado para el *Mine to Mill*, con indicadores que faciliten el control y actualización en el tiempo. Ello permitirá disponer de herramientas para medir los beneficios obtenidos.
- c. Disponer de un equipo de personas con las habilidades y conocimientos adecuados.
- d. La existencia del liderazgo y compromiso de la gerencia general y su equipo.
- e. Contar con una adecuada estructura y cultura organizacional.

## Capítulo 5

### Descripción de los casos del *Benchmarking Mine to Mill*

En el presente capítulo se describen los 15 casos de *Mine to Mill* que han sido analizados: su ubicación, mineral producido, y tipo de sistema productivo empleado. De estos casos se extraerá información de los resultados obtenidos en la implementación del *Mine to Mill*, en especial: factor de potencia, energía específica y tonelaje *SAG*. Estos datos se reportan en el análisis comparativo que se presenta en el capítulo 6.

Cada uno de los casos han sido presentados y publicados en congresos referentes al tema, abarcando operaciones alrededor del mundo.

Tabla 5. Descripción de los casos analizados.

| <i>Unidad Minera</i> | <i>Empresa</i>      | <i>País</i> | <i>Metal</i> | <i>Tecnología Molienda</i> | <i>Fuente</i>                      | <i>Incremento de tonelaje (%)</i> | <i>Reducción de energía (%)</i> |
|----------------------|---------------------|-------------|--------------|----------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| Paddington           | Norton Gold Fields  | Australia   | Au           | SAG Bolas                  | SAG Conference 2015                | 35.5                              | 27.3                            |
| Andina               | Codelco             | Chile       | Cu, Mo       | SAG Bolas                  | Revista ReMetallica 2008           | 13.7                              | 12.7                            |
| Ahafo                | Newmont Gold        | Ghana       | Au           | SAG Bolas                  | SAG Conference 2011                | 8.4                               | 20.4                            |
| Cerro Corona         | Gold Fields         | Perú        | Au, Cu       | SAG Bolas                  | SAG Conference 2015                | 15.0                              | 8.6                             |
| Cuajone              | Southern Copper     | Perú        | Cu, Mo       | HPGR Bolas                 | Perumin 32° Convención Minera 2015 | 2.2                               |                                 |
| Antamina             | BHP-Glencore-Teck   | Perú        | Cu, Zn, Mo   | SAG Bolas                  | SAG Conference 2011                | 30.9                              | 25.0                            |
| Ban Houayxai         | Panaust             | Laos        | Au, Ag       |                            | FragBlast11 Australia 2015         | 24.2                              | 17.3                            |
| Porguera             | Barrick             | Papua       | Au           | SAG Bolas                  | Publicación CRC ORE Australia 2013 | 15.0                              |                                 |
| Kalgoorlie           | KCGM                | Australia   | Au           | SAG Bolas                  | Publicación CRC ORE Australia 2013 | 18.2                              | 15.7                            |
| Red Dog              | Teck                | USA         | Zn, Pb       | SAG Bolas                  | Publicación CRC ORE Australia 2013 | 12.0                              |                                 |
| Sandsloot            | Angloplatinum       | Sudáfrica   | Pt           | AG Bolas                   | Publicación CRC ORE Australia 2013 | 18.5                              |                                 |
| Gol-e-Gohar          | Gol-e-Gohar Company | Iran        | Fe           | SAG AG                     | FragBlast 11 Australia 2015        | 14.7                              | 14.3                            |
| Salabo Mine          | Vale                | Brasil      | Cu           | HPGR Bolas                 | Procemin 2016                      | 2.0                               |                                 |
| Candelaria           | Freeport            | Chile       | Cu, Mo       | SAG Bolas                  | Procemin 2008                      | 4.5                               |                                 |
| Cadia                | Newcrest Mining     | Australia   | Au, Cu       | SAG                        | SAG Conference 2001                | 13.7                              |                                 |

*Nota:* Elaboración propia.

### 5.1.Caso de estudio 1: Paddington Gold

La operación Paddington Gold se encuentra a 35 km al noroeste de Kalgoorlie, en el oeste de Australia. La planta se basa en la tecnología convencional de carbón en pulpa que es una operación eficiente y de bajo costo para procesamiento de oro. Comprende una chancadora giratoria, un circuito de molienda SAG y molino de bolas, recuperación por gravedad y lixiviación de cianuro.

La optimización del proceso consistió en la variación de la malla de voladura y el factor de potencia <sup>9</sup>logrando así mejoras significativas en el rendimiento del molino y la reducción en el consumo de energía. Se logró incrementar el tonelaje en 36%.

*Tabla 6. Resultados Paddington Gold*

| <i>Resultados</i>             | <i>Unidades</i>   | <i>Prueba 1<br/>(Estándar)</i> | <i>Prueba 2</i> |
|-------------------------------|-------------------|--------------------------------|-----------------|
| Factor de potencia            | Kg/m <sup>3</sup> | 0.72                           | 1.46            |
| Energía específica            | Kw-h/t            | 23.8                           | 17.3            |
| Tonelaje SAG                  | tph               | 307                            | 416             |
| <b>Incremento de tonelaje</b> | <b>%</b>          |                                | <b>36</b>       |

*Nota:* Adaptado de “Mine to Mill Optimisation at Paddington Gold Operations” (Kanchibotla, S. S., et. al 2015).

### 5.2.Caso de estudio 2: División Andina de Codelco

La División Andina se encuentra ubicada en la parte alta de la cordillera de la V Región, a 38 km de la ciudad de Los Andes y a 50 km al nordeste de Santiago. Andina beneficia sus minerales por procesos de concentración, utilizando las técnicas de

---

<sup>9</sup> Factor de potencia, es la medida del peso del explosivo requerido para fragmentar un volumen o peso de roca, lo podemos expresar en kg/ton ó kg/m<sup>3</sup>.

molienda SAG y técnicas de molienda convencional, molienda húmeda en molinos de barras y bolas, flotación, filtración y almacenamiento del concentrado de cobre.

La División Andina de Codelco, desarrolló un plan extenso de evaluación del concepto mina-planta aplicando mayor energía en la etapa de voladura. Se realizaron trece voladuras, donde se observaron las variaciones de la malla de voladura y el factor de potencia. Estos cambios originaron que la capacidad de procesamiento del molino SAG aumentara paulatinamente cerca del 14%. Junto con esto, el consumo específico de energía de la molienda SAG y de los molinos de bolas mostró una reducción.

*Tabla 7. Resultados División Andina de Codelco.*

| <i>Resultados</i>             | <i>Unidades</i> | <i>Prueba 1<br/>(Estándar)</i> | <i>Prueba 2</i> |
|-------------------------------|-----------------|--------------------------------|-----------------|
| Factor de potencia            | Kg/ton          | 0.2                            | 0.27            |
| Energía específica            | Kw-h/t          | 16.6                           | 14.5            |
| Tonelaje SAG                  | tph             | 1,290                          | 1,467           |
| <b>Incremento de tonelaje</b> | <b>%</b>        |                                | <b>14</b>       |

*Nota:* Adaptado de “Evaluación del concepto mina-planta en la planta de molienda semiautógena de División Andina de Codelco Chile” (Titicocha, G., et. al 2008).

### **5.3.Caso de estudio 3: Newmont Ahafo**

La operación Ahafo está situada en la región de Brong-Ahafo, en el medio oeste de Ghana, entre la región de Ashanti y la frontera de Costa de Marfil.

Mediante la participación Metso *PIO*<sup>10</sup> y Ahafo se lograron mejoras significativas en el rendimiento general del proceso. Se midió una mejora del rendimiento total de al menos 8% durante un período de 12 meses.

<sup>10</sup> *PIO (Process Integration & Optimisation)*, Integración y optimización de procesos.

Ahafo tenía potencial para beneficiarse completamente del proyecto *PIO* mediante la exploración del efecto de las mezclas de mineral Apensu y Awonsu y la variabilidad esperada en la dureza del mineral. Finalmente, Ahafo pudo incorporar beneficios de *PIO* y desarrollar prácticas de operación estándar para los circuitos *SAG* y de molino de bolas cuando se procesan tipos de mineral limitados por molinos de bolas.

*Tabla 8.* Resultados Newmont Ahafo

| <i>Resultados</i>             | <i>Unidades</i> | <i>Prueba 1<br/>(Estándar)</i> | <i>Prueba 2</i> |
|-------------------------------|-----------------|--------------------------------|-----------------|
| Factor de potencia            | Kg/ton          | 0.36                           | 0.53            |
| Energía específica            | Kw-h/t          | 10.8                           | 8.6             |
| Tonelaje <i>SAG</i>           | tph             | 1,016                          | 1,101           |
| <b>Incremento de tonelaje</b> | <b>%</b>        |                                | <b>8</b>        |

*Nota:* Adaptado de “Improvement in SAG Mill Throughput from Finer Feed Size at the Newmont Ahafo Operation” (Dance, A., et. al 2011).

#### **5.4.Caso de estudio 4: Gold Fields Cerro Corona**

La operación de Gold Fields Cerro Corona se ubica en la región Cajamarca, provincia de Hualgayoc, distrito de Hualgayoc, en la comunidad campesina de Tingo. Produce concentrado de oro y cobre a través de procesos de voladura, chancado, molienda y flotación.

En 2010, la operación comenzó a experimentar cambios en la dureza del mineral que afectó significativamente el rendimiento de la planta. Caracterizar y gestionar la dureza del mineral tuvo un impacto positivo en la productividad de los procesos posteriores.

Este proyecto demostró que la voladura efectiva proporciona una fragmentación mejorada que aumenta la productividad de carga y acarreo, reduce el mantenimiento de

los equipos de minería y procesamiento, aumenta la producción y reduce el consumo de energía en los circuitos de trituración aguas abajo.

*Tabla 9. Resultados Gold Fields Cerro Corona.*

| <i>Resultados</i>             | <i>Unidades</i> | <i>Prueba 1<br/>(Estándar)</i> | <i>Prueba 2</i> |
|-------------------------------|-----------------|--------------------------------|-----------------|
| Factor de potencia            | Kg/ton          | 0.31                           | 0.65            |
| Energía específica            | Kw-h/t          | 3.5                            | 3.2             |
| Tonelaje SAG                  | tph             | 808                            | 929             |
| <b>Incremento de tonelaje</b> | <b>%</b>        |                                | <b>15</b>       |

*Nota:* Adaptado de “Diagnosis of process health, its treatment and improvement to maximise plant throughput at Goldfields Cerro Corona.” (Diaz, R., et. al 2015).

### **5.5.Caso de estudio 5: Southern Perú Cuajone**

Cuajone es una mina de cobre a cielo abierto ubicado en el distrito de Torata, provincia de Mariscal Nieto, departamento de Moquegua. Produce concentrado de cobre y molibdeno a través de su planta concentradora mediante los procesos de chancado, molienda y flotación.

El costo de perforación y voladura en mina es aproximadamente el 20% del costo directo, un material más fragmentado y homogéneo implica mayor cantidad de finos, menores costos en trituración, y por ende mayor tonelaje tratado en molienda primaria.

La mina Cuajone tiene varios tipos de roca que van con índices de dureza (Work Index) desde 13 hasta 22 de Wi en mineral. De la prueba realizada en la roca BA-FIL-PTK (Andesita basáltica filica potásica) se ha determinado que por reducción de malla de voladura se ha obtenido una mejora de la fragmentación en un 38% y un incremento en la molienda de 2%. El sistema automatizado con el que cuenta permitió seguir mejorando en el proceso de perforación y voladura como parte del proceso de mejora continua.

*Tabla 10. Resultados Southern Perú Cuajone.*

| <i>Resultados</i>             | <i>Unidades</i> | <i>Prueba 1<br/>(Estándar)</i> | <i>Prueba 2</i> |
|-------------------------------|-----------------|--------------------------------|-----------------|
| Factor de potencia            | Kg/ton          | 0.3                            | 0.39            |
| Tonelaje                      | tph             | 3,659                          | 3,739           |
| <b>Incremento de tonelaje</b> | <b>%</b>        |                                | <b>2</b>        |

*Nota:* Adaptado de “Fragmentación Online y su Influencia en la Optimización de la Voladura.” (Cruces, J., 2015).

### **5.6.Caso de estudio 6: Compañía Minera Antamina**

La Compañía Minera Antamina está ubicada en el distrito de San Marcos, provincia de Huarí en la Región Ancash, a 200 km de la ciudad de Huaraz. Es un complejo minero polimetálico que produce concentrados de cobre y zinc como productos primarios y concentrados de molibdeno, plomo, bismuto y plata como subproductos.

En 2007, *Metso Process Technology and Innovation (PTI)* fue contratada para aumentar el rendimiento del molino *SAG* integrando y optimizando la fragmentación, trituración y molienda para los minerales M4 / M4A (CuZn) más duros. Tras la implementación de las recomendaciones proporcionadas por Metso *PTI*, el rendimiento del molino *SAG* aumentó de 2750 tph para alcanzar un promedio de 3600 tph durante el resto del 2007.

Debido a la aplicación continuada de la filosofía de integración y optimización de la mina, para 2010, la concentradora excedió consistentemente el objetivo de 4400 tph mientras se procesan minerales CuZn más duros.

*Tabla 11. Resultados Compañía Minera Antamina.*

| <i>Resultados</i>             | <i>Unidades</i> | <i>Prueba 1<br/>(Estándar)</i> | <i>Prueba 2</i> |
|-------------------------------|-----------------|--------------------------------|-----------------|
| Energía específica            | Kw-h/t          | 14.0                           | 10.5            |
| Tonelaje SAG                  | tph             | 2,750                          | 3,600           |
| <b>Incremento de tonelaje</b> | <b>%</b>        |                                | <b>31</b>       |

*Nota:* Adaptado de “Optimisation and Continuous Improvement of Antamina Comminution Circuit.” (Rybinski, E., et. al 2011).

### **5.7.Caso de estudio 7: Ban Houayxai Mine**

Ban Houayxai es una mina de oro y plata operada por Phu Bia Mining Limited en Laos desde 2012. Los primeros dos años de operación procesaron predominantemente mineral blando oxidado. De acuerdo al plan, en los años posteriores se procesaría un mineral primario más duro, en consecuencia, la fragmentación de estos sería mucho más gruesa que para los minerales de óxido blando. Dentro de los planes a futuro se tenía que este mineral primario más grueso y duro reduzca significativamente el rendimiento del molino y la productividad minera.

La gerencia de Ban Houayxai se dio cuenta del potencial riesgo de caída en la producción cuando se procesaba minerales más duros e implementó un proyecto de optimización de voladura para entregar mineral fresco a la planta sin aumentar indebidamente la dilución y el daño inducidos por la explosión.

Se implementó un proyecto de optimización de perforación y voladura con el objetivo de mejorar el rendimiento del molino a través de ensayos sistemáticos y monitoreo integral de tronadura y planta.

*Tabla 12. Resultados Ban Houayxai Mine.*

| <i>Resultados</i>             | <i>Unidades</i>   | <i>Prueba 1<br/>(Estándar)</i> | <i>Prueba 2</i> |
|-------------------------------|-------------------|--------------------------------|-----------------|
| Factor de potencia            | Kg/m <sup>3</sup> | 0.8                            | 1.4             |
| Energía específica            | Kw-h/t            | 12.7                           | 10.5            |
| Tonelaje SAG                  | tph               | 500                            | 621             |
| <b>Incremento de tonelaje</b> | <b>%</b>          |                                | <b>24</b>       |

*Nota:* Adaptado de “Optimisation of drill and blast for mill throughput improvement at Ban Houayxai Mine.” (Gaunt, J., et. al 2015).

### **5.8.Caso de estudio 8: Porgera Gold Mine**

Porgera está ubicado en la provincia de Enga, Papua Nueva Guinea, ubicada en la cabecera del valle de Porgera. La mina de Porgera es una gran operación a tajo abierto de oro y plata con un esquema de conminución convencional que consistía en: chancado primario, SAG y molino de bolas.

El enfoque consistió en: caracterizar la voladura y determinar las características de fragmentación de la alimentación del molino; simulación de diseños de explosión alterados para lograr una fragmentación más fina; selección de un diseño prometedor de explosión y prueba de ese diseño en la práctica, monitoreo del resultado de la fragmentación y finalmente la inspección del circuito de molienda para evaluar el rendimiento resultante del tamaño del alimento.

En la práctica, el factor de potencia se incrementó desde el estándar de 0,24 Kg/ton a valores de 0,35 y 0,38 kg/ton mediante el ajuste del patrón de perforación para lograr una fragmentación más fina y, por lo tanto, una alimentación del molino SAG también más fina.

Tabla 13. Resultados Porguera Gold Mine.

| <i>Resultados</i>             | <i>Unidades</i> | <i>Prueba 1<br/>(Estándar)</i> | <i>Prueba 2</i> |
|-------------------------------|-----------------|--------------------------------|-----------------|
| Factor de potencia            | Kg/ton          | 0.24                           | 0.38            |
| Tonelaje SAG                  | tph             | 673                            | 774             |
| <b>Incremento de tonelaje</b> | <b>%</b>        |                                | <b>15</b>       |

*Nota:* Adaptado de “Maximising SAG mill throughput at Porgera Gold Mine by optimising blast fragmentation.” (Lam, M., et. al 2001).

### 5.9.Caso de estudio 9: Kalgoorlie

La operación de KCGM está ubicada en Kalgoorlie, Australia Occidental y trata el mineral del llamado *Super Pit*.

Este estudio se realizó como parte de los proyectos *AMIRA* P483 y P483A. El primer proyecto involucró el desarrollo de la fragmentación, modelos de circuitos de trituración y simulación de diseños de voladura modificados. El segundo proyecto involucraba actualizar los modelos para reflejar el rendimiento de voladura en los bancos de minería actuales seguidos de implementación de un diseño de voladura revisado y monitoreo del rendimiento del circuito de trituración en un período extendido que se acerca a los dos años.

La primera etapa del desarrollo del modelo de voladura y trituración se orientó a lograr una fragmentación más fina. El factor de carga era aumentado ajustando el patrón de perforación y cambiando el explosivo a una emulsión de *VOD*<sup>11</sup> más alta.

---

<sup>11</sup> Velocidad de detonación (*VOD*), es la velocidad a la que la onda de detonación se propaga a través del explosivo y por lo tanto es el parámetro que define el ritmo de liberación de energía.

*Tabla 14. Resultados Kalgoorlie.*

| <i>Resultados</i>             | <i>Unidades</i> | <i>Prueba 1<br/>(Estándar)</i> | <i>Prueba 2</i> |
|-------------------------------|-----------------|--------------------------------|-----------------|
| Factor de potencia            | Kg/ton          | 0.58                           | 0.96            |
| Energía Especifica            | Kw-h/t          | 10.2                           | 8.6             |
| Tonelaje SAG                  | tph             | 1,100                          | 1,300           |
| <b>Incremento de tonelaje</b> | <b>%</b>        |                                | <b>18</b>       |

*Nota:* Adaptado de “Understanding Mine to Mill” (McKee, D. J., 2013).

### 5.10. Caso de estudio 10: Red Dog

La operación Red Dog es una de las minas de zinc más grandes del mundo. Se pudo desarrollar gracias al acuerdo entre la empresa minera Teck con la empresa Nana, de los aborígenes de Alaska, propietarios de las tierras. Está a unos 170 kilómetros al norte del círculo polar ártico en la zona noroeste de Alaska, cerca de Kotzebue. Red Dog es una operación que utiliza circuito semiautogeno que consiste en un molino SAG en circuito cerrado con sus ciclones seguido de un molino de bolas también en circuito cerrado con ciclones.

Los modelos de fragmentación y trituración se desarrollaron de la manera estándar. Se realizaron simulaciones de voladura para evaluar el efecto de los diseños de explosivos modificados sobre la fragmentación. Los resultados para lograr la fragmentación más fina que se implementó en la mina se resumen a continuación.

*Tabla 15. Resultados Red Dog Operation.*

| <i>Resultados</i>             | <i>Unidades</i> | <i>Prueba 1<br/>(Estándar)</i> | <i>Prueba 2</i> |
|-------------------------------|-----------------|--------------------------------|-----------------|
| Factor de potencia            | Kg/ton          | 0.29                           | 0.45            |
| Tonelaje SAG                  | tph             | 125                            | 140             |
| <b>Incremento de tonelaje</b> | <b>%</b>        |                                | <b>12</b>       |

*Nota:* Adaptado de “Understanding Mine to Mill” (McKee, D. J., 2013).

### 5.11. Caso de estudio 11: Sandsloot Mine

La operación de Anglo Platinum está situada en la parte norte del Complejo Bushveld, 250 km al este de Johannesburgo, Sudáfrica. Sandsloot es actualmente la mina de platino a cielo abierto más grande del mundo.

Se hizo el estudio con el objetivo de mejorar el rendimiento operacional tanto en la mina a cielo abierto como en planta considerando el rendimiento del sistema total de la mina y la planta en lugar de las partes individuales de la operación. El enfoque involucró la caracterización geotécnica del cuerpo en una escala de bloques y la incorporación de la ficha geotécnica en el modelo de bloques.

Una de las aplicaciones del modelo de bloque mejorado fue estudiar el impacto de la voladura de los bloques en las tasas de carga de la pala, la fragmentación y el rendimiento del molino posterior. Se desarrollaron modelos simples de voladura para permitir la adaptación del diseño de voladura a escala de bloque para lograr la fragmentación deseada.

*Tabla 16.* Resultados Sandsloot Mine.

| <i>Resultados</i>             | <i>Unidades</i> | <i>Prueba 1<br/>(Estándar)</i> | <i>Prueba 2</i> |
|-------------------------------|-----------------|--------------------------------|-----------------|
| Factor de potencia            | Kg/ton          | 1.3                            | 1.9             |
| Tonelaje SAG                  | tph             | 146                            | 173             |
| <b>Incremento de tonelaje</b> | <b>%</b>        |                                | <b>18</b>       |

*Nota:* Adaptado de “Understanding Mine to Mill” (McKee, D. J., 2013).

### 5.12. Caso de estudio 12: Gol-e-Gohar Mine

La mina Gol-E-Gohar se encuentra en 60 km al suroeste de Sirjan, en la provincia de Kerman del República Islámica de Irán. Procesa mineral de hierro, para ello cuenta

con un sistema de cominución que incluye voladura, chancado primario, un molino SAG y dos molinos AG.

El esquema utilizado para esta aplicación de *Mine to Mill* fue la modificación del diseño de la malla de voladura, incluyendo el factor de carga, para obtener beneficios en el tonelaje procesado por los molinos y en reducción de la energía consumida.

Se realizaron voladuras con el diseño de malla convencional de 5x6 m y 1.65 kg/m<sup>3</sup> de factor de carga. Las cuales fueron contrastadas luego con voladuras mejoradas con malla de 4x5 m y 2.48kg/m<sup>3</sup> de factor de carga.

*Tabla 17. Resultados Gol-e-Gohar Mine.*

| <i>Resultados</i>             | <i>Unidades</i>   | <i>Prueba 1<br/>(Estándar)</i> | <i>Prueba 2</i> |
|-------------------------------|-------------------|--------------------------------|-----------------|
| Factor de potencia            | Kg/m <sup>3</sup> | 1.65                           | 2.48            |
| Tonelaje total                | tph               | 1,370                          | 1,572           |
| Energía específica total      | kWh/t             | 4.2                            | 3.6             |
| <b>Incremento de tonelaje</b> | <b>%</b>          |                                | <b>15</b>       |

*Nota:* Adaptado de “Study of the Effect of Blast Pattern Design on Autogenous and Semi-autogenous Mill Throughput at Gol-e-Gohar Iron Ore Mine” (Hakami, A., et. al 2015).

### **5.13. Caso de estudio 13: Salobo Mine**

Salobo es una operación a tajo abierto de minería de cobre ubicada en Brasil que tiene como principal producto concentrado de cobre. Esta operación comprende dos etapas: Salobo I que inicia actividades en 2012 con una capacidad de 12 Mt/año y Salobo II que inicia en 2014 con una capacidad de 24 Mt/año.

Es durante el comisionamiento de la segunda etapa de Salobo en donde se propone el esquema de *Mine to Mill* el cuál integra la cadena productiva desde la mina hasta la planta. Se toma como punto de inicio la mejora en la etapa de voladura a fin de mejorar toda la cadena de procesamiento de mineral.

El esquema de cominución de Salobo comprende la voladura, chancado primario, clasificación y chancado secundario en chancadoras cónicas, chancado terciario en *HPGR*, clasificación y molienda en molinos de bolas. Se realizó el análisis de la contribución en tonelaje sobre cada etapa de cominución a partir de la mejora en la voladura, obteniendo los siguientes resultados.

*Tabla 18.* Resultados Salobo Mine.

| <i>Resultados</i>             | <i>Unidades</i>   | <i>Prueba 1<br/>(Estándar)</i> | <i>Prueba 2</i> |
|-------------------------------|-------------------|--------------------------------|-----------------|
| Fuerza explosiva              | RBS <sup>12</sup> | 125                            | 160             |
| Tonelaje total                | tph               | 3000                           | 3060            |
| <b>Incremento de tonelaje</b> | <b>%</b>          |                                | <b>2</b>        |

*Nota:* Adaptado de “Mine to Plant Commissioning in Salobo Mine” (Alarcon, J., et. al 2016).

#### **5.14. Caso de estudio 14: Candelaria Mine**

La mina Candelaria está ubicada en la Región III de Atacama, norte de Chile. Sus instalaciones comprenden una planta de trituración, un concentrador y el puerto Punta Padrones. La mina fue descubierta en 1987 como un depósito de cobre, oro y óxido de hierro, y comenzó a operar en 1993.

A finales del 2005 la producción de molienda en Candelaria se había reducido significativamente debido al aumento de la dureza del material procesado. Este material constituiría parte importante del material a ser procesado en el futuro, por lo que Candelaria decide explorar oportunidades para incrementar su tasa de procesamiento en

---

<sup>12</sup> *RBS (Relative Bulk Strength)*, la potencia relativa por volumen permite modificar rápidamente las dimensiones originales del burden y espaciamento, de esta manera permite ahorrar tiempo y costo en los ensayos de prueba y error para la implementación de las nuevas dimensiones en las operaciones de perforación y voladura.

molienda mediante la optimización de la rotura y fragmentación de la roca desde la voladura, a través del chancado y la molienda.

Las oportunidades exploradas se enfocan principalmente en la caracterización del cuerpo mineral a través de modelos geológicos y estructurales, mejoras en las prácticas de voladura, fragmentación del mineral *ROM*, así como optimización del chancado y molienda, de las cuales se tienen los siguientes resultados.

*Tabla 19. Resultados Candelaria Mine.*

| <i>Resultados</i>             | <i>Unidades</i>   | <i>Prueba 1<br/>(Estándar)</i> | <i>Prueba 2</i> |
|-------------------------------|-------------------|--------------------------------|-----------------|
| Tonelaje <i>SAG</i>           | tph               | 1,550                          | 1,620           |
| Factor de potencia            | Kg/m <sup>3</sup> | 1.26                           | 1.57            |
| <b>Incremento de tonelaje</b> | <b>%</b>          |                                | <b>15</b>       |

*Nota:* Adaptado de “Process Integration and Optimisation at Freeport – McMoran Candelaria Mine” (Valery, W., et. al 2008).

### **5.15. Caso de estudio 15: Cadia Hill Mine**

Cadia Hill comprende una serie de grandes minas de oro y cobre, subterráneas y a cielo abierto, ubicadas en el Valle de Cadia, a unos 20 kilómetros al sur de la ciudad regional de Orange, Nueva Gales del Sur, Australia.

Cadia Hill alcanzó rápidamente el 90% de la razón de procesamiento durante el comisionamiento del circuito de molienda *SAG - SABC*, pero se hizo evidente que no se podría llegar al 100% a menos que se hagan modificaciones sobre las condiciones operativas y de diseño. Para levantar el inconveniente, el equipo de Cadia Hill en conjunto con *JKMRC* realizaron una serie de propuestas para aumentar la tasa de procesamiento del circuito, teniendo en consideración mantener una alta disponibilidad del circuito de molienda.

Se realizaron modificaciones en las áreas críticas del proceso como voladura, alimentación al circuito, condiciones operativas del molino *SAG*, chancado de *pebbles*, diseño de *liners*, etc. Finalmente se logró aumentar significativamente la tasa de procesamiento del circuito de molienda *SAG*.

*Tabla 20. Resultados Cadia Hill.*

| <i>Resultados</i>             | <i>Unidades</i>   | <i>Prueba 1<br/>(Estándar)</i> | <i>Prueba 2</i> |
|-------------------------------|-------------------|--------------------------------|-----------------|
| Tonelaje <i>SAG</i>           | tph               | 2,040                          | 2,320           |
| Factor de potencia            | Kg/m <sup>3</sup> | 0.8                            | 1.2             |
| <b>Incremento de tonelaje</b> | <b>%</b>          |                                | <b>14</b>       |

*Nota:* Adaptado de “Optimisation of the Cadia Hill SAG Mill circuit” (Hart, S., et. al 2001).

## Capítulo 6

### Análisis de resultados de los casos *Mine to Mill*

#### 6.1. Análisis de casos *Mine to Mill* – Mina

De acuerdo a los casos estudiados, en todos se ha visto modificación de su factor de potencia. Las formas de incrementar el factor de potencia son:

- Modificando la malla de voladura.
- Reduciendo el taco<sup>13</sup>.
- Aumentando el diámetro de perforación.
- Cambiando a un explosivo de mayor potencia.

En el presente estudio, casi la totalidad de casos optan por las tres primeras opciones. Solo en un caso se tuvo un cambio de explosivo por uno de mayor fuerza, manteniendo las dimensiones de los parámetros de voladura.

Observando la estadística antes y después de la optimización que se muestra en las tablas 21 y 22, se tiene en promedio que el factor de potencia se incrementa en un 50%. Las mallas de voladura se han mantenido casi iguales. La mayoría de operaciones incrementan el factor de potencia reduciendo el taco, esto por ahorrar los costos de perforación que implicaría mallas más cerradas.

Respecto a los tacos, en promedio se reduce de 4.4 a 4.2 m, asimismo los diámetros de perforación, en promedio se incrementan de 211 a 222 mm. Las alturas de

---

<sup>13</sup> Taco, es la distancia entre la boca del taladro hasta la parte superior de la columna explosiva debe ser llenada con material estéril, para dar confinamiento a los gases de la explosión y reducir el chorro de aire (air blast).

los bancos se mantienen en promedio bastante similares. Únicamente una operación, Paddington, optó por incrementar la altura de sus bancos de 5 a 10 m.

Para el caso de los costos de voladura y perforación, solo dos operaciones reportaron costos, Cerro Corona y Candelaria. En el caso de Candelaria se tienen los costos del antes y después, notándose un incremento en el costo de voladura de 0.32 a 0.36 \$/t, equivalente a un 12.5%, mientras que el incremento de factor de potencia fue de 1.26 a 1.57 kg/t, representando 25%. Este incremento de factor de potencia se debe al menor taco empleado.

Lógicamente, esta diferencia de costos es pequeña y originada en el tipo de explosivos. Si se incrementa el factor de potencia por medio del ajuste de las mallas de voladura los costos de perforación se deben sumar a esto.

Para el caso de Gold Fields se reporta un incremento de factor de potencia del doble, de 0.31 kg/t a 0.65 kg/t por medio de la variación del *burden*<sup>14</sup>, espaciamento<sup>15</sup>, taco y cambio de explosivo. El incremento de costo proporcional es de 0.42 a 0.82 \$/t que equivale a un 95%.

A continuación, se presentan las tablas 21 y 22 en las que se detallan los casos estudiados de *Mine to Mill* en lo referente a los parámetros de voladura antes y después de la optimización.

---

<sup>14</sup> *Burden*, es la distancia perpendicular desde un taladro hasta la superficie libre más cercana en el momento de la detonación.

<sup>15</sup> Espaciamento, distancia entre taladros y cargas en una fila, medida perpendicularmente hacia el *burden* y paralelo a la cara libre del movimiento esperado de la roca.

Tabla 21. Parámetros de voladura antes de la optimización.

| N°              | Unidad<br>Minera | Factor de potencia |             | RBS        | Altura<br>banco<br>m | Espacia<br>miento<br>m | Burden<br>m | Sobreperfo<br>ración <sup>16</sup><br>m | Taco<br>m  | Diámetro<br>m | Tipo de<br>explosivo | Densidad<br>g/cm3 | Costo<br>US\$/t |
|-----------------|------------------|--------------------|-------------|------------|----------------------|------------------------|-------------|---|------------|---------------|----------------------|-------------------|-----------------|
|                 |                  | Kg/t               | Kg/m3       |            |                      |                        |             |   |            |               |                      |                   |                 |
| 1               | Paddington       |                    | 0.72        |            | 5.00                 | 3.5                    | 3.0         | 0.5                                     | 2.3        | 115           | Titan 3080G          | 1.15              |                 |
| 2               | Andina           | 0.20               |             |            |                      |                        |             |   |            |               |                      |                   |                 |
| 3               | Ahafo            | 0.36               |             |            | 8.00                 | 4.0                    | 3.5         |   |            | 140           | Emulsion             |                   |                 |
| 4               | Cerro Corona     | 0.31               |             |            | 10.0                 | 6.0                    | 5.2         | 1.0                                     | 4.5        | 200           | 100%                 | 1.20              | 0.42            |
| 5               | Cuajone          | 0.30               |             |            | 15.0                 | 8.0                    | 7.0         | 1.0                                     | 5.5        | 311           | HA-46                | 1.25              |                 |
| 6               | Antamina         |                    |             |            |                      | 8.0                    | 7.0         |   |            |               | HA 45/55             |                   |                 |
| 7               | Ban Houayxai     |                    | 0.80        |            | 10.0                 | 4.8                    | 4.2         | 1.0                                     | 3.3        | 152           |                      |                   |                 |
| 8               | Porguera         | 0.24               |             |            | 10.0                 | 6.3                    | 5.3         | 0.6                                     | 5.3        |               |                      | 1.25              |                 |
| 9               | Kalgoorlie       | 0.58               |             |            | 11.3                 | 5.8                    | 5.0         |   | 5.0        |               | Titan 4070           | 1.10              |                 |
| 10              | Red Dog          | 0.29               |             |            |                      |                        |             |   |            |               | Hanfo                |                   |                 |
| 11              | Sandsloot        | 1.30               |             |            |                      |                        |             |   |            |               | ANFO                 |                   |                 |
| 12              | Gol-e-Gohar      |                    | 1.65        |            | 15.0                 | 6.0                    | 5.0         | 2.0                                     | 5.0        | 251           |                      |                   |                 |
| 13              | Salobo           |                    |             | 125        |                      |                        |             |   |            |               | Emulite              |                   |                 |
| 14              | Candelaria       |                    | 1.26        |            |                      | 6.0                    | 8.0         |   |            | 311           | ANFO                 |                   | 0.32            |
| 15              | Cadia            |                    | 0.80        |            |                      |                        |             |   |            |               | Apex 150             |                   |                 |
| <b>Promedio</b> |                  | <b>0.40</b>        | <b>1.00</b> | <b>125</b> | <b>10.5</b>          | <b>5.8</b>             | <b>5.3</b>  | <b>1.0</b>                              | <b>4.4</b> | <b>211</b>    |                      | <b>1.19</b>       | <b>0.37</b>     |

Nota: Elaboración propia.

<sup>16</sup> Sobreperforación, es la longitud del barreno por debajo del nivel del piso que se necesita para romper la roca a la altura del banco y lograr una fragmentación y desplazamiento adecuado que permita al equipo de carga alcanzar la cota de excavación prevista.

Tabla 22. Parámetros de voladura después de la optimización.

| N°              | Unidad<br>Minera | Factor de potencia |             | RBS        | Altura<br>banco<br>m | Espacia<br>miento<br>m | Burden<br>m | Sobreper<br>foración<br>m | Taco<br>m  | Diámetro <sup>17</sup><br>m | Tipo de<br>explosivo | Densidad<br>g/cm3 | Costo<br>US\$/t |
|-----------------|------------------|--------------------|-------------|------------|----------------------|------------------------|-------------|---------------------------|------------|-----------------------------|----------------------|-------------------|-----------------|
|                 |                  | Kg/t               | Kg/m3       |            |                      |                        |             |                           |            |                             |                      |                   |                 |
| 1               | Paddington       |                    | 1.46        |            | 10.0                 | 4.0                    | 3.5         | 1.0                       | 3.0        | 165                         | Titan 3080G          |                   |                 |
| 2               | Andina           | 0.27               |             |            |                      |                        |             |                           |            |                             |                      |                   |                 |
| 3               | Ahafo            | 0.53               |             |            | 8.00                 | 4.0                    | 3.5         |                           |            | 165                         | 80% Emulsion         |                   |                 |
| 4               | Cerro Corona     | 0.65               |             |            | 10.0                 | 4.7                    | 4.0         | 1.0                       | 3.5        | 200                         | HA-73                | 2.04              | 0.82            |
| 5               | Cuajone          | 0.39               |             |            | 15.0                 | 7.0                    | 6.0         | 1.0                       | 5.5        | 311                         | 45/55                |                   |                 |
| 6               | Antamina         |                    |             |            |                      | 7.0                    | 6.0         |                           |            |                             |                      |                   |                 |
| 7               | Ban Houayxai     |                    | 1.40        |            | 10.0                 | 3.8                    | 3.3         | 1.5                       | 3.0        | 152                         |                      |                   |                 |
| 8               | Porguera         | 0.38               |             |            | 10.0                 | 5.5                    | 4.5         | 0.5                       | 4.7        |                             | Titan 4070           |                   |                 |
| 9               | Kalgoorlie       | 0.96               |             |            | 11.3                 | 5.0                    | 4.0         |                           | 5.0        |                             | Emusion              |                   |                 |
| 10              | Red Dog          | 0.45               |             |            |                      |                        |             |                           |            |                             | 70/30 Emulsion       |                   |                 |
| 11              | Sandsloot        | 1.90               |             |            |                      |                        |             |                           |            |                             |                      |                   |                 |
| 12              | Gol-e-Gohar      |                    | 2.48        |            | 15.0                 | 5.0                    | 4.0         | 2.0                       | 5.0        | 251                         | Emulite              |                   |                 |
| 13              | Salobo           |                    |             | 160        |                      |                        |             |                           |            |                             | Emulsion             |                   |                 |
| 14              | Candelaria       |                    | 1.57        |            |                      | 8.0                    | 8.0         |                           |            | 311                         | Apex 150             |                   | 0.36            |
| 15              | Cadia            |                    | 1.20        |            |                      |                        |             |                           |            |                             |                      |                   |                 |
| <b>Promedio</b> |                  | <b>0.70</b>        | <b>1.60</b> | <b>160</b> | <b>11.2</b>          | <b>5.2</b>             | <b>4.7</b>  | <b>1.2</b>                | <b>4.2</b> | <b>222</b>                  |                      | <b>2.04</b>       | <b>0.59</b>     |

Nota: Elaboración propia.

<sup>17</sup> Diámetro, definido por el diámetro de la broca de perforación. Diseñado según las características del macizo rocoso, el grado de fragmentación deseado, la altura del banco, configuración de las cargas y por el equipo de perforación seleccionado.

## 6.2. Análisis de casos *Mine to Mill* – Planta

En esta sección se analizará la ganancia en el tonelaje y el descenso en el consumo de energía. A continuación, en la tabla 23, se detallan los casos *Mine to Mill* estudiados referidos a los parámetros de planta antes y después de la optimización.

Tabla 23. Datos operativos de molienda antes y después de la optimización.

| N°              | Unidad Minera | Antes de la optimización |           |                    |                       |                   | Después de la optimización |                   |                    |             |           |
|-----------------|---------------|--------------------------|-----------|--------------------|-----------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|--------------------|-------------|-----------|
|                 |               | Tonelaje                 | F80       | Energía específica | Wi Bond <sup>18</sup> | AxB <sup>19</sup> | Tonelaje                   | F80 <sup>20</sup> | Energía específica | Wi Bond     | AxB       |
|                 |               | tph                      | mm        | kWh/t              | kWh/t                 |                   | tph                        | mm                | kWh/t              | kWh/t       |           |
| 1               | Paddington    | 307                      | 93        | 23.8               | 14.4                  | 35                | 416                        | 80                | 17.3               | 11.2        | 45        |
| 2               | Andina        | 1290                     |           | 16.6               | 16.5                  |                   | 1467                       |                   | 14.5               | 15.0        |           |
| 3               | Ahafo         | 1016                     |           | 10.8               |                       |                   | 1101                       |                   | 8.6                |             |           |
| 4               | Cerro Corona  | 808                      | 64        | 3.5                |                       |                   | 929                        | 51                | 3.2                |             |           |
| 5               | Cuajone       | 3659                     |           |                    |                       |                   | 3739                       |                   |                    |             |           |
| 6               | Antamina      | 2750                     | 110       | 14.0               |                       |                   | 3600                       | 55                | 10.5               |             |           |
| 7               | Ban Houayxai  | 500                      |           | 12.7               |                       |                   | 621                        |                   | 10.5               |             |           |
| 8               | Porguera      | 673                      | 75        |                    |                       |                   | 774                        | 35                |                    |             |           |
| 9               | Kalgoorlie    | 1100                     |           | 10.2               |                       |                   | 1300                       |                   | 8.6                |             |           |
| 10              | Red Dog       | 125                      |           |                    |                       |                   | 140                        |                   |                    |             |           |
| 11              | Sandsloot     | 146                      |           |                    |                       |                   | 173                        |                   |                    |             |           |
| 12              | Gol-e-Gohar   | 1370                     |           | 4.2                |                       |                   | 1572                       |                   | 3.6                |             |           |
| 13              | Salobo        | 3000                     |           |                    |                       |                   | 3060                       |                   |                    |             |           |
| 14              | Candelaria    | 1550                     | 127       |                    |                       |                   | 1620                       | 125               |                    |             |           |
| 15              | Cadia         | 2040                     | 92        |                    |                       |                   | 2320                       | 70                |                    |             |           |
| <b>Promedio</b> |               | <b>1356</b>              | <b>93</b> | <b>12.0</b>        | <b>15.5</b>           | <b>35</b>         | <b>1522</b>                | <b>69</b>         | <b>9.6</b>         | <b>13.1</b> | <b>45</b> |

Nota: Elaboración propia.

<sup>18</sup> *Work Index Bond*, indicador de la tenacidad del mineral, Kwh/t. Permite estimar la energía (Kwh) requerida para moler cada unidad (ton) de mineral.

<sup>19</sup> AxB, resistencia a la fractura por impacto de los minerales. Valores AxB > 75 implican un mineral de baja competencia y, por lo tanto, un bajo consumo específico de energía (CEE). Por otra parte, un AxB < 40 se refiere a minerales de alta competencia y de alto consumo específico de energía (CCE).

<sup>20</sup> F80, Tamaño 80% pasante en la alimentación.

### a. Ganancia en tonelaje

La figura 16 muestra el incremento en el tonelaje de los casos estudiados. De los 15 casos analizados, se observó un incremento desde un valor mínimo del 2% para el caso de Salobo Mine, hasta un valor máximo de 36% para el caso de Paddington.

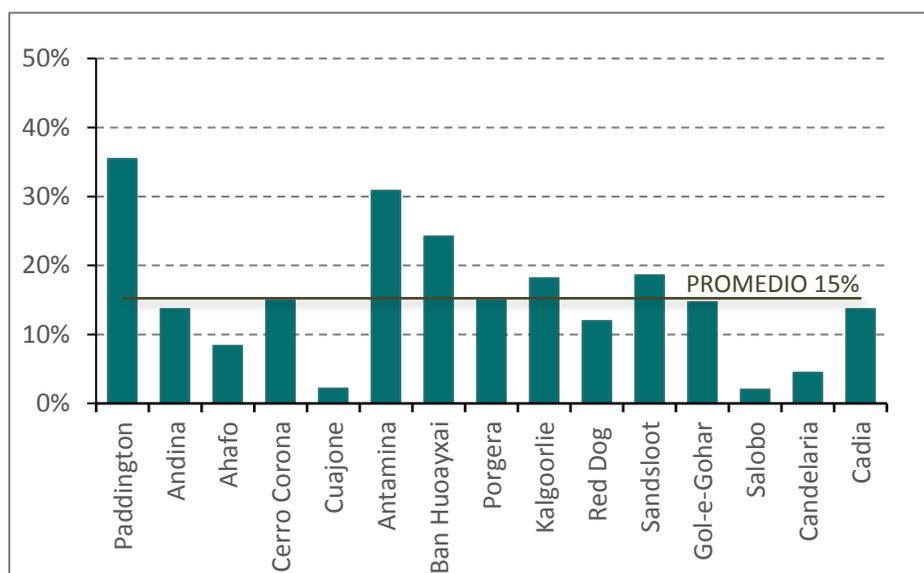


Figura 16. Incremento en el tonelaje.  
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 17 se observa que la mayor frecuencia en el incremento del tonelaje está en el rango de 11 a 15% para la muestra de plantas estudiadas que aplicaron la metodología *Mine to Mill*.

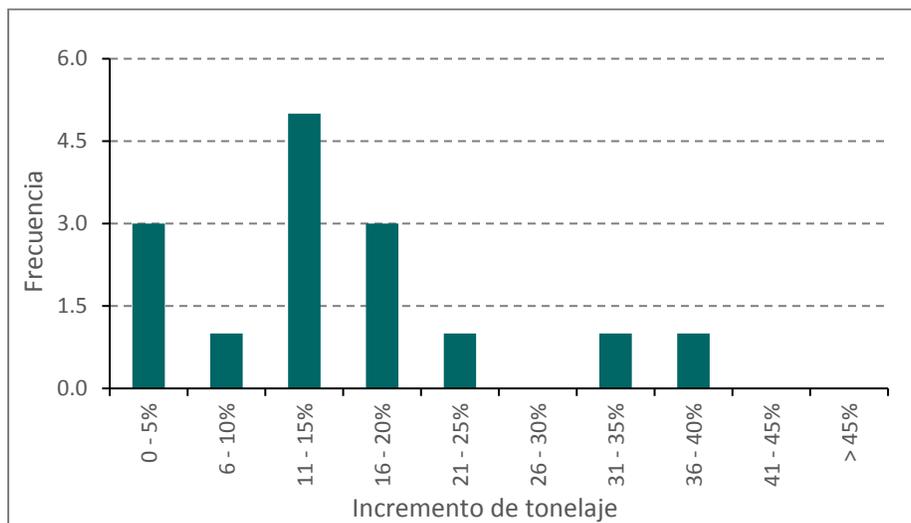


Figura 17. Frecuencia del incremento en el tonelaje.  
Fuente: Elaboración propia.

Un hecho que resalta es que las operaciones que cuentan con tecnología *SAG* son más sensibles a incrementar tonelaje en el *Mine to Mill*. Esto se debe a la fuerte relación que tiene el tonelaje procesado por el molino *SAG* con las características granulométricas de la alimentación. Caso contrario, se observa para las operaciones que cuentan con tecnología *HPGR* como es el caso de Cuajone y Salobo Mine cuyos incrementos en el tonelaje fueron de 2.2 y 2% respectivamente.

En la figura 18, se puede analizar la elasticidad del tonelaje respecto al factor de potencia para las unidades que cuentan con molienda *SAG*, por cada 10% que sube el factor de potencia, el tonelaje se incrementó en un 3%. A pesar de tratarse de unidades mineras diferente, la correlación hallada es buena. A excepción de Cerro Corona, todas las demás operaciones relacionan bien el porcentaje de incremento de tonelaje con el porcentaje de incremento de factor de potencia.

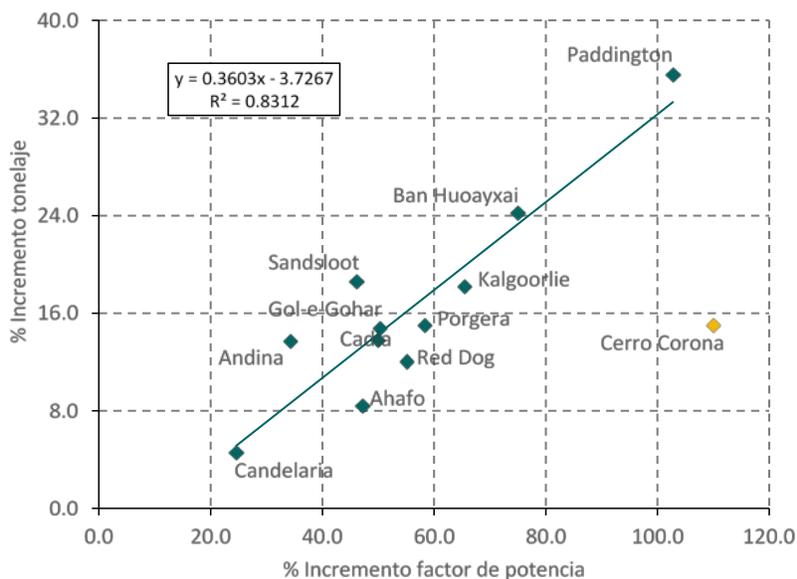


Figura 18. Correlación entre el factor de potencia y tonelaje.  
Fuente: Elaboración propia.

#### b. Descenso en consumo de energía

La figura 19 y la figura 20 nos muestran el porcentaje descenso de ratio de energía en las operaciones que aplicaron *Mine to Mill*. El valor del porcentaje de descenso de energía está entre 11 y 25% con un promedio de 18%. En la figura 20, la mayor cantidad de operaciones estudiadas presentan reducción de energía entre 10 a 25%. Esto valida la propuesta del *Mine to Mill* de lograr un descenso en el consumo específico de energía.

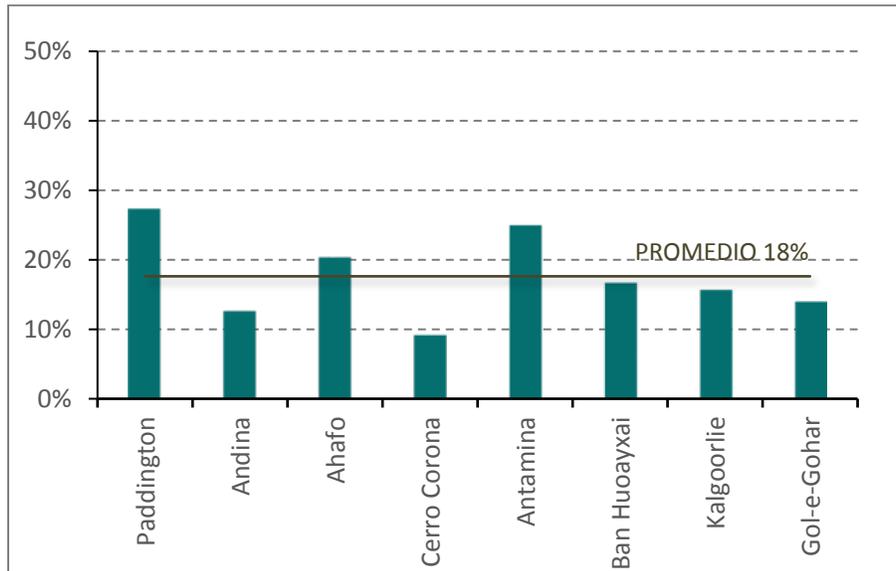


Figura 19. Porcentaje de descenso del ratio de consumo de energía.  
Fuente: Elaboración propia.

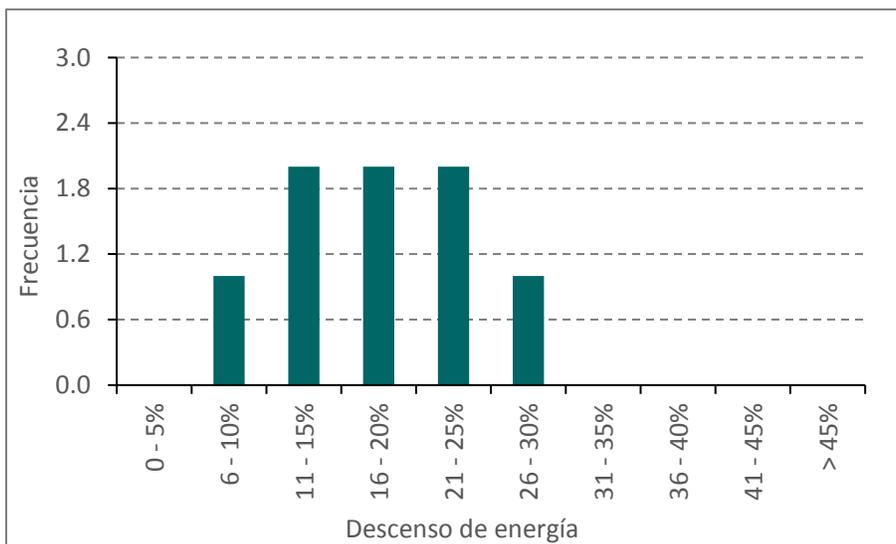


Figura 20. Frecuencia del porcentaje de descenso del ratio de energía.  
Fuente: Elaboración propia.

La figura 21 nos muestra la elasticidad de la reducción de consumo de energía con respecto al factor de potencia. Por cada 10% que se incremente el factor de potencia la

energía reduce 1.7%. No todas las operaciones reportaron evaluaciones en sus consumos de energía por lo que el resultado no se puede generalizar.

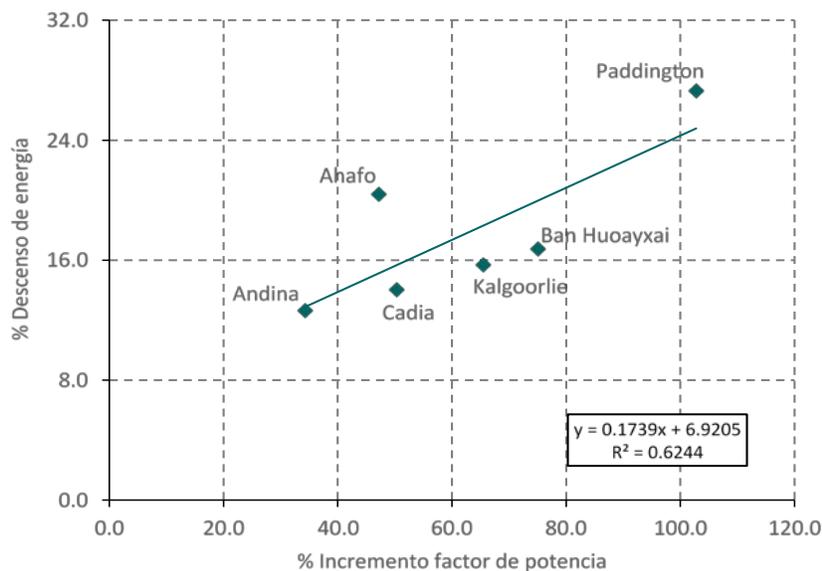


Figura 21. Correlación entre el factor de potencia y descenso de energía.  
Fuente: Elaboración propia.

De lo observado, es evidente el efecto que tiene el usar mayor cantidad de explosivos en la voladura sobre el tonelaje de molienda y en el consumo de energía. Esto se debe a dos factores: la disminución en el tamaño de alimentación a planta y una reducción de la dureza por efecto de la creación de microfracturas.

## Capítulo 7

### Evaluación económica de dos casos

En este capítulo se presenta la evaluación económica de la implementación del *Mine to Mill* en los casos de Cerro Corona y Candelaria. En estos casos se muestra el beneficio contundente que se obtiene de la aplicación de estrategias de integración *Mine to Mill*. Ambos ejercicios fueron realizados con datos de los estudios publicados de estas empresas y solo son cantidades de manera referencial. La ganancia calculada está basada en los datos de la aplicación del *Mine to Mill* para ambas empresas, Cerro Corona 2011 y Candelaria 2016. Para ambos casos la aplicación fue en la optimización de la molienda SAG.

#### 7.1.Caso Cerro Corona

En el caso de Cerro Corona, la aplicación del *Mine to Mill* tuvo un efecto muy fuerte en el incremento de tonelaje llegando hasta 15.9% de acuerdo al estudio publicado (Díaz, R, et. al 2015). Esto significó 121 tph adicionales al molino SAG. A su vez se tuvo un ahorro de energía de 0.32 kWh/t por descenso del *work index*.

##### a. Beneficios en incremento de tonelaje

Tabla 24. Cálculo del tonelaje adicional por año.

| <i>Cálculo del tonelaje adicional por año</i> |                |            |
|---|----------------|------------|
| Toneladas adicionales a procesar              | 121            | tph        |
| Disponibilidad de planta                      | 92             | %          |
| Horas al día                                  | 24             | h          |
| Días al año                                   | 365            | días       |
| <b>Toneladas adicionales a procesar</b>       | <b>975,163</b> | <b>tpy</b> |

Nota: Elaboración propia.

Tabla 25. Cálculo del adicional de cobre y oro fino por año.

| <i>Cálculo del adicional de Cu y Au fino por año</i> |                  |           |                           |               |            |
|--|------------------|-----------|---------------------------|---------------|------------|
| Ley de cabeza Cu                                     | 0.55             | %         | Ley de cabeza Au          | 1.36          | g/t        |
| Recuperación de Cu                                   | 85               | %         | Recuperación de Au        | 68            | %          |
| Cu fino  | 10,052,348       | Lb        | Au fino                   | 28,998        | ozt        |
| <b>Cu fino pagable(*)</b>                            | <b>9,549,731</b> | <b>Lb</b> | <b>Au fino pagable(*)</b> | <b>26,098</b> | <b>ozt</b> |

Nota: Elaboración propia.

(\*) El pagable de cobre fino se considera al 95%. El pagable de oro fino se considera 90%.

Tabla 26. Cálculo de los descuentos.

| <i>Descuentos de Cu y Au</i> |                  |             |                              |                |             |
|------------------------------|------------------|-------------|------------------------------|----------------|-------------|
| Maquila(*)                   | 3,800,797        | US\$        | Maquila                      | -              | US\$        |
| Gastos de refinación Cu(**)  | 954,973          | US\$        | Gastos de refinación Au (**) | 260,980        | US\$        |
| <b>Total descuentos</b>      | <b>4,755,770</b> | <b>US\$</b> | <b>Total descuentos</b>      | <b>260,980</b> | <b>US\$</b> |

Nota: Elaboración propia.

(\*) El costo de la maquila para el cobre es 250 US\$/t de concentrado. Asumimos que el cobre fino es el 30% del concentrado (grado en el concentrado). Para el caso del oro, no se considera un costo de maquila al ser un subproducto de la fundición.

(\*\*) Para los gastos de refinación de cobre se considera 0.10 US\$/lb de cobre pagable. Para el caso del oro se considera 10 US\$/ozt de oro pagable.

Tabla 27. Cálculo del beneficio anual por incremento de tonelaje.

| <i>Cálculo del beneficio anual</i> |                   |             |                         |            |      |
|------------------------------------|-------------------|-------------|-------------------------|------------|------|
| Beneficio de Cu fino(*)            | 38,198,922        | US\$        | Beneficio de Au fino(*) | 40,999,960 | US\$ |
| Costo operativo(**)                | -14,324,595       | US\$        |                         |            |      |
| Descuentos Cu                      | -4,755,770        | US\$        | Descuentos Au           | -260,980   | US\$ |
| <b>Beneficio neto</b>              | <b>59,857,536</b> | <b>US\$</b> |                         |            |      |

Nota: Elaboración propia.

(\*) El precio de cobre es 4.0 US\$/lb de cobre fino pagable. El precio del oro es 1,571 US\$/ozt (Año 2011).

(\*\*) Se considera un costo operativo de 1.5 US\$/lb.

### b. Beneficio en ahorro de energía

Tabla 28. Cálculo del beneficio anual por ahorro de energía.

|  | <i>Antes</i> | <i>Después</i> |
|--|--------------|----------------|
| Toneladas al año, t                        | 6,515,783    | 7,481,967      |
| Ratio de consumo de energía, kWh/t         | 3.49         | 3.17           |
| Costo de energía, US\$/kWh                 | 0.075        | 0.075          |
| Costo de energía anual, US\$               | 1,705,506    | 1,779,075      |
| <b>Beneficio por energía ahorrada,US\$</b> |              | <b>73,569</b>  |

Nota: Elaboración propia.

### c. Incremento de costo en la mina

Tabla 29. Cálculo del incremento del costo en la mina.

|                            | <i>Antes</i> | <i>Después</i>   |
|----------------------------|--------------|------------------|
| Costo de explosivo, US\$/t | 0.42         | 0.82             |
| Tonelaje minado hora       | 808          | 929              |
| Tonelaje minado año        | 6,511,834    | 7,486,997        |
| Costo anual, US\$          | 2,734,970    | 6,139,337        |
| <b>Aumento costo, US\$</b> |              | <b>3,404,367</b> |

Nota: Elaboración propia.

### d. Ganancia Global

Tabla 30. Cálculo de la ganancia global.

|                        | <i>US\$</i>       |
|------------------------|-------------------|
| Beneficio por tonelaje | 59,857,536        |
| Beneficio por energía  | 73,569            |
| Costo adicional mina   | -3,404,367        |
| <b>Neto</b>            | <b>56,526,738</b> |

Nota: Elaboración propia.

El incremento de costos en la mina por razón de explosivos fue de 3.4 MUS\$. Este incremento en costos es ampliamente superado por la ganancia de tonelaje que se tuvo dando un saldo positivo de 56.5 MUS\$. El ahorro de energía es pequeño comparado

al beneficio por incremento de tonelaje. El costo del estudio de *Mine to Mill*, si bien no se especifica, de ser en promedio 300 KUS\$, es rápidamente recuperable.

## 7.2.Caso Candelaria

En el caso de Candelaria, la aplicación del *Mine to Mill* fue orientado a incrementar el tonelaje. El incremento de tonelaje fue de 4.5% lo cual significo en tonelaje 70 tph según el estudio publicado (Valery, W., et. al 2008). No se cuenta con datos de energía.

### a. Beneficios en incremento de tonelaje

Tabla 31. Cálculo del tonelaje adicional por año.

| <i>Cálculo del tonelaje adicional por año</i> |                |            |
|---|----------------|------------|
| Toneladas adicionales a procesar              | 70             | tph        |
| Disponibilidad de planta                      | 92             | %          |
| Horas al día                                  | 24             | h          |
| Días al año                                   | 365            | días       |
| <b>Toneladas adicionales a procesar</b>       | <b>564,144</b> | <b>tpy</b> |

Nota: Elaboración propia.

Tabla 32. Cálculo del adicional de cobre fino por año.

| <i>Cálculo del adicional de Cu fino por año</i> |                  |           |
|---|------------------|-----------|
| Ley de cabeza Cu                                | 0.55             | %         |
| Recuperación de Cu                              | 85               | %         |
| Cu fino   | 5,815,408        | lb        |
| <b>Pagable Cu fino*</b>                         | <b>5,524,638</b> | <b>lb</b> |

Nota: Elaboración propia.

(\*) El pagable de cobre fino se considera al 95%.

*Tabla 33. Cálculo de los descuentos.*

| <i>Descuentos</i>       |                  |             |
|-------------------------|------------------|-------------|
| Maquila*                | 2,202,806        | US\$        |
| Gasto de refinación**   | 552,464          | US\$        |
| <b>Total descuentos</b> | <b>2,750,275</b> | <b>US\$</b> |

*Nota:* Elaboración propia.

(\*) El costo de la maquila es 250 US\$/t de concentrado. Asumimos que el cobre fino es el 30% del concentrado (grado en el concentrado).

(\*\*) Para los gastos de refinación se considera 0.10 US\$/lb de cobre pagable.

*Tabla 34. Cálculo del beneficio anual por incremento de tonelaje.*

| <i>Cálculo del beneficio anual</i> |                  |             |
|------------------------------------|------------------|-------------|
| Beneficio por Cu fino (*)          | 20,441,159       | US\$        |
| Costo operativo (**)               | -8,286,956       | US\$        |
| Descuentos                         | -2,750,275       | US\$        |
| <b>Beneficio neto</b>              | <b>9,398,933</b> | <b>US\$</b> |

*Nota:* Elaboración propia.

(\*) El precio de cobre fino es 3.7 US\$/lb de cobre fino pagable (Año 2016).

(\*\*) Se considera un costo operativo de 1.5 US\$/lb.

#### **b. Incremento de costo en la mina**

*Tabla 35. Cálculo del incremento del costo en la mina.*

|                            | <i>Antes</i> | <i>Después</i> |
|----------------------------|--------------|----------------|
| Costo de explosivo, US\$/t | 0.32         | 0.36           |
| Tonelaje minado hora       | 1,550        | 1,620          |
| Tonelaje minado año        | 12,320,640   | 12,877,056     |
| Costo anual, US\$          | 3,942,605    | 4,635,740      |
| <b>Aumento costo, US\$</b> |              | <b>693,135</b> |

*Nota:* Elaboración propia.

### c. Ganancia Global

Tabla 36. Cálculo de la ganancia global.

|                        | <i>US\$</i>      |
|------------------------|------------------|
| Beneficio por tonelaje | 9,398,933        |
| Costo adicional mina   | -693,135         |
| <b>Neto</b>            | <b>8,705,797</b> |

*Nota:* Elaboración propia.

Por incremento en explosivos se tiene un aumento en el costo de 0.7 MUS\$. El balance global es de una ganancia de 8.7 MUS\$ al año siendo mucho mayor el beneficio logrado por el aumento de tonelaje que los costos por incremento en el presupuesto de explosivos. El costo del estudio de *Mine to Mill*, si bien no se especifica, debe ser en promedio 300 KUS\$, el cual, también es rápidamente recuperable.

## Capítulo 8

### **Análisis de las variables organizativas mediante encuestas**

Para el estudio de las variables organizativas se recopiló información a partir de dos encuestas enviadas tanto a operadores de minas como a consultores de renombre internacional. Aunque en la encuesta no solo se investigó las variables organizacionales sino también los aspectos técnicos y los resultados obtenidos. La encuesta enviada a cada uno de ellos puede verse en el Apéndice 1 y 2. Para el caso de los operadores la encuesta incluyó 21 preguntas mientras que para el caso de los proveedores la encuesta incluyó 35 preguntas. Todas las preguntas realizadas fueron acerca de sus opiniones personales sobre los beneficios y desafíos del *Mine to Mill* que han podido ver a lo largo de sus carreras. Esta información ilustra las percepciones de los actores directamente involucrados sobre lo que sucede cuando se implementa un proyecto de *Mine to Mill*. En este capítulo se analizarán los resultados de estas encuestas.

#### **8.1. Encuesta *Mine to Mill* – Operadores**

En la presente sección se presentan los resultados obtenidos en la encuesta dirigida a los operadores de las plantas que implementaron el *Mine to Mill*. Se han agrupado en 6 partes, empezando por la información general de los proyectos *Mine to Mill* en los cuales los encuestados trabajaron, los beneficios que este trae, la continuidad del proyecto, los factores organizacionales, los factores técnicos y otras consideraciones y recomendaciones. Las características generales de la primera encuesta, dirigida a los operadores de *Mine to Mill* se presentan a continuación.

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| <b>Objetivo del estudio:</b>    | Recolectar opiniones sobre la implementación y sostenibilidad del <i>Mine to Mill</i> . |
| <b>Universo:</b>                | Supervisores Senior y Superintendentes.   |
| <b>Técnica de recolección:</b>  | Encuesta escrita vía e-mail.  |
| <b>Tamaño de muestra:</b>       | 7 personas.   |
| <b>Cuestionario:</b>            | Estructurado.   |
| <b>Fecha en que se realizó:</b> | Del 15 de noviembre al 15 de diciembre 2017.  |

### 8.1.1. Información general

Esta sección resume los resultados de las preguntas 1, 2, 3, 4, 5, 16 y 17 de la encuesta a operadores y dan cuenta de las características generales sobre los proyectos de implementación de *Mine to Mill*.

**Año de implementación.** Los proyectos en los que participaron los operadores encuestados se implementaron entre el 2009 y 2017.

**Razones.** Las principales razones para la implementación de estos proyectos fueron las siguientes cuatro:

- Mejorar los indicadores de producción.
- Mejor control de las variables operativas desde la mina hasta la planta.
- Incremento de finos en la alimentación a molienda.
- Optimización de la capacidad de molienda.

**Promotor.** En cuanto a la identificación de cuál fue el área que promovió el proyecto, todos respondieron que la planta fue quien lo hizo.

**Duración.** En cuanto a la duración de la implementación, de los encuestado que respondieron, la mayoría respondió que de seis meses a un año. Además, en la pregunta N° 16 se les preguntó sobre el **metal que explotan y la tecnología empleada**. La mayoría de encuestados (6 de 7) respondieron que explotan cobre con tecnología de molienda SAG.

**Inversión.** En la pregunta N° 17 se les consultó por la inversión realizada, respondiendo en promedio US\$ 250mil, y que la recuperación de la inversión fue muy rápida.

### 8.1.2. Beneficios obtenidos

La mayoría responde que se obtiene un incremento en el tonelaje de hasta 20%, una reducción de la energía menor a 10%. En recuperación la mayoría responde que no se tuvo efecto en flotación dado el efecto del P80 en flotación de los mayores tonelajes.

Tabla 37. Resultados encuesta a operadores pregunta 6.

| Criterio      | Incremento tonelaje |     | Reducción energía |     | Incremento recuperación |     |
|---------------|---------------------|-----|-------------------|-----|-------------------------|-----|
|               | Frecuencia          | %   | Frecuencia        | %   | Frecuencia              | %   |
| De 0 a < 10%  | 3                   | 43  | 5                 | 71  | 6                       | 86  |
| De 10 a < 20% | 4                   | 57  | 1                 | 14  | 0                       | 0   |
| De 20 a < 30% | 0                   | 0   | 0                 | 0   | 0                       | 0   |
| Igual o >30%  | 0                   | 0   | 0                 | 0   | 0                       | 0   |
| No responde   | 0                   | 0   | 1                 | 14  | 1                       | 14  |
| Total         | 7                   | 100 | 7                 | 100 | 7                       | 100 |

Nota: Elaboración propia.

Estos resultados concuerdan con los que se obtuvieron en los 15 estudios analizados en el capítulo anterior.

### 8.1.3. Factores organizacionales

Cuando se consultó en qué medida las variables organizacionales influyen en el éxito o fracaso en la implementación de la estrategia del *Mine to Mill*, la mayoría de los encuestados responde que “liderazgo de la gerencia general” y “trabajo en equipo mina-

planta”, son fundamentales para la implementación del *Mine to Mill*, todos los encuestados respondieron alto o muy alto el efecto de estos factores. El tercer factor fue “desalineamiento de los *KPI* entre gerencias” en el cual 6 de 7 respondieron como alto o muy alto. El cuarto factor fue “resistencia al cambio” que obtuvo 5 de 7 respuestas como alto o muy alto (pregunta N° 7).

**Tabla 38.** Resultados encuesta a operadores pregunta 7 (factores organizacionales).

| Criterio | 1          |     | 2          |     | 3          |     | 4          |     | 5          |     | 6          |     | 7          |     |
|----------|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|
|          | Frecuencia | %   |
| Muy bajo | 0          | 0   | 0          | 0   | 1          | 14  | 1          | 14  | 0          | 0   | 0          | 0   | 1          | 14  |
| Bajo     | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 1          | 14  | 0          | 0   | 0          | 0   |
| Medio    | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 1          | 14  | 3          | 43  | 4          | 57  | 3          | 43  |
| Alto     | 2          | 29  | 1          | 14  | 3          | 43  | 2          | 29  | 1          | 14  | 2          | 29  | 1          | 14  |
| Muy Alto | 5          | 71  | 6          | 86  | 3          | 43  | 3          | 43  | 2          | 29  | 1          | 14  | 1          | 14  |
| Total    | 7          | 100 | 7          | 100 | 7          | 100 | 7          | 100 | 7          | 100 | 7          | 100 | 7          | 100 |

*Nota:* Elaboración propia. <sup>1</sup>Liderazgo Gerencia General. <sup>2</sup>Trabajo en equipo Mina – Planta.

<sup>3</sup>Desalineamiento de los *KPI* entre gerencias. <sup>4</sup>Resistencia al cambio. <sup>5</sup>Dificultad para medir los beneficios.

<sup>6</sup>Cultura organizacional. <sup>7</sup>No contar con un departamento de integración Mina – Planta].

Otra pregunta relacionada a factores organizacionales es la pregunta N° 14, en ella se pregunta si el hecho que dos gerencias diferentes participen en esta implementación del *Mine to Mill* afecta a la continuidad del proyecto y en qué aspectos específicos. En la Tabla 39 se analizan los aspectos específicos que se preguntaron. Frente a los aspectos específicos, las respuestas fueron bastante dispersas ya que iban desde bajo hasta alto, aunque 3 de 7 encuestados indicaron que los factores organizacionales y operacionales afectaban en grado alto la continuidad del proyecto. Los factores técnicos y económico tuvieron menores respuestas altas.

Tabla 39. Resultados encuesta a operadores pregunta 14 (participación de dos gerencias)

| Criterio    | Organizacionales |     | Operacionales |     | Económicos |     | Técnicos   |     |
|-------------|------------------|-----|---------------|-----|------------|-----|------------|-----|
|             | Frecuencia       | %   | Frecuencia    | %   | Frecuencia | %   | Frecuencia | %   |
| Muy bajo    | 0                | 0   | 0             | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   |
| Bajo        | 2                | 29  | 2             | 29  | 2          | 29  | 2          | 29  |
| Medio       | 1                | 14  | 1             | 14  | 2          | 29  | 1          | 14  |
| Alto        | 3                | 43  | 3             | 43  | 1          | 14  | 2          | 29  |
| Muy Alto    | 0                | 0   | 0             | 0   | 1          | 14  | 1          | 14  |
| No responde | 1                | 14  | 1             | 14  | 1          | 14  | 1          | 14  |
| Total       | 7                | 100 | 7             | 100 | 7          | 100 | 7          | 100 |

Nota: Elaboración propia.

#### 8.1.4. Continuidad del proyecto

Se les preguntó a los operadores si el *Mine to Mill* continuaba aplicándose a la fecha de la encuesta, a lo cual 5 de 7 respondieron que sí. Cuando se les preguntó qué factores organizacionales influyeron en su continuidad, factores de liderazgo de la gerencia general y trabajo integrado en equipo mina-planta, resultaron los de mayor impacto en la percepción de los operadores.

Tabla 40. Resultados encuesta a operadores pregunta 9 (continuidad del proyecto)

| Criterio    | 1          |     | 2          |     | 3          |     | 4          |     | 5          |     | 6          |     | 7          |     |
|-------------|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|
|             | Frecuencia | %   |
| Muy bajo    | 0          | 0   | 0          | 0   | 1          | 14  | 1          | 14  | 0          | 0   | 0          | 0   | 1          | 14  |
| Bajo        | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   |
| Medio       | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 1          | 14  | 3          | 43  | 3          | 43  | 1          | 14  |
| Alto        | 2          | 29  | 0          | 0   | 2          | 29  | 3          | 43  | 2          | 29  | 2          | 29  | 3          | 43  |
| Muy Alto    | 4          | 57  | 6          | 86  | 2          | 29  | 1          | 14  | 1          | 14  | 1          | 14  | 1          | 14  |
| No responde | 1          | 14  | 1          | 14  | 2          | 29  | 1          | 14  | 1          | 14  | 1          | 14  | 1          | 14  |
| Total       | 7          | 100 | 7          | 100 | 7          | 100 | 7          | 100 | 7          | 100 | 7          | 100 | 7          | 100 |

Nota: Elaboración propia. [<sup>1</sup>Liderazgo Gerencia General. <sup>2</sup>Trabajo en equipo Mina – Planta.

<sup>3</sup>Desalineamiento de los KPI entre gerencias. <sup>4</sup>Resistencia al cambio. <sup>5</sup>Dificultad para medir los beneficios.

<sup>6</sup>Cultura organizacional. <sup>7</sup>No contar con un departamento de integración Mina – Planta].

#### 8.1.5. Factores técnicos

En esta sección se resumen los resultados a las preguntas relacionadas a los factores técnicos que influyen en la implementación del *Mine to Mill*. Se han identificado cuatro factores técnicos: riesgos, dureza, fragmentación y cantidad de explosivos que se desarrollan a continuación.

- a. Riesgo asociado a la voladura.** Los riesgos de deslizamiento de tierra, inestabilidad geotécnica, son asociados a la voladura, por ello se preguntó si estos riesgos influyeron en la implementación y la sostenibilidad del *Mine to Mill*. (pregunta N° 10). En este caso hay dispersión en las respuestas, cuatro de los siete encuestados contestaron que el efecto de los riesgos asociados a la voladura influyó en la implementación y el sostenimiento del *Mine to Mill* de manera muy alta o alta. Sin embargo, para tres encuestados esta variable influye en un nivel medio y bajo.

*Tabla 41.* Resultados encuesta a operadores pregunta 10 (Riesgo en voladura).

| Criterio    | Implementación |     | Sostenimiento |     |
|-------------|----------------|-----|---------------|-----|
|             | Frecuencia     | %   | Frecuencia    | %   |
| Muy bajo    | 0              | 0   | 0             | 0   |
| Bajo        | 1              | 14  | 1             | 14  |
| Medio       | 2              | 29  | 2             | 29  |
| Alto        | 1              | 14  | 1             | 14  |
| Muy Alto    | 3              | 43  | 3             | 43  |
| No responde | 0              | 0   | 0             | 0   |
| Total       | 7              | 100 | 7             | 100 |

*Nota:* Elaboración propia.

- b. Dureza del mineral.** Este resultó el factor técnico de mayor impacto. Frente a la pregunta sobre el impacto de la dureza del mineral en los siguientes procesos en la implementación del *Mine to Mill*, para la mayoría de los encuestados la dureza del mineral afecta la perforación (6 de 7) y voladura (5 de 7) en nivel alto y muy alto y la capacidad de planta en un nivel alto y muy alto, (6 de 7) (pregunta N° 11).

Tabla 42. Resultados encuesta a operadores pregunta 11 (dureza).

| Criterio    | Perforación |     | Voladura   |     | Carguío    |     | Acarreo    |     | Capacidad de planta |     |
|-------------|-------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|---------------------|-----|
|             | Frecuencia  | %   | Frecuencia | %   | Frecuencia | %   | Frecuencia | %   | Frecuencia          | %   |
| Muy bajo    | 0           | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0                   | 0   |
| Bajo        | 0           | 0   | 0          | 0   | 3          | 43  | 3          | 43  | 0                   | 0   |
| Medio       | 1           | 14  | 2          | 29  | 3          | 43  | 3          | 43  | 1                   | 14  |
| Alto        | 4           | 57  | 4          | 57  | 1          | 14  | 1          | 14  | 1                   | 14  |
| Muy Alto    | 2           | 29  | 1          | 14  | 0          | 0   | 0          | 0   | 5                   | 71  |
| No responde | 0           | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0                   | 0   |
| Total       | 7           | 100 | 7          | 100 | 7          | 100 | 7          | 100 | 7                   | 100 |

Nota: Elaboración propia.

- c. Fragmentación.** Este es un segundo factor de alta importancia. Al preguntarse, cuál es el impacto de la mayor fragmentación en los siguientes procesos en la implementación del *Mine to Mill*, la fragmentación lograda por el *Mine to Mill* afecta los procesos de carguío (5 de 7) y acarreo (4 de 7) de manera positiva y todos indicaron que afecta la capacidad de planta en mucho mayor medida. (pregunta N° 12).

Tabla 43. Resultados encuesta a operadores pregunta 12 (fragmentación).

| Criterio    | Carguío    |     | Acarreo    |     | Desgaste equipo |     | Planta     |     |
|-------------|------------|-----|------------|-----|-----------------|-----|------------|-----|
|             | Frecuencia | %   | Frecuencia | %   | Frecuencia      | %   | Frecuencia | %   |
| Muy bajo    | 0          | 0   | 0          | 0   | 0               | 0   | 0          | 0   |
| Bajo        | 1          | 14  | 1          | 14  | 1               | 14  | 0          | 0   |
| Medio       | 1          | 14  | 1          | 14  | 3               | 43  | 0          | 0   |
| Alto        | 5          | 71  | 4          | 57  | 3               | 43  | 1          | 14  |
| Muy Alto    | 0          | 0   | 0          | 0   | 0               | 0   | 6          | 86  |
| No responde | 0          | 0   | 1          | 14  | 0               | 0   | 0          | 0   |
| Total       | 7          | 100 | 7          | 100 | 7               | 100 | 7          | 100 |

Nota: Elaboración propia.

- d. Cantidad de explosivos en la fragmentación.** Cuando se pregunta qué factores limitan el incremento de la cantidad de explosivos en la fragmentación (pregunta N° 13), la mayor limitante para el uso de más explosivos son los aspectos geotécnicos. El incremento del costo unitario de voladura queda en un segundo lugar.

Tabla 44. Resultados encuesta a operadores pregunta 13 (cantidad de explosivos)

| Criterio    | Geotécnia  |     | Acarreo    |     | Costo voladura |     |
|-------------|------------|-----|------------|-----|----------------|-----|
|             | Frecuencia | %   | Frecuencia | %   | Frecuencia     | %   |
| Muy bajo    | 0          | 0   | 0          | 0   | 0              | 0   |
| Bajo        | 1          | 14  | 2          | 29  | 0              | 0   |
| Medio       | 1          | 14  | 5          | 71  | 2              | 29  |
| Alto        | 0          | 0   | 0          | 0   | 4              | 57  |
| Muy Alto    | 5          | 71  | 0          | 0   | 1              | 14  |
| No responde | 0          | 0   | 0          | 0   | 0              | 0   |
| Total       | 7          | 100 | 7          | 100 | 7              | 100 |

Nota: Elaboración propia.

- e. **Verificación de factores técnicos.** Como una pregunta de control se volvió a preguntar sobre las características técnicas de la mina se verificó que el tipo de yacimiento y la tecnología de conminución (7 de 7 respuestas alto y muy alto) son dos características determinantes, mientras que, entre los factores, el grado de fragmentación (7 de 7 lo calificaron como alto o muy alto) y finalmente la dureza del mineral (5 de los 7 calificaron como alto o muy alto) fueron los dos factores más altos.

Tabla 45. Resultados encuesta a operadores pregunta 15.

| Criterio    | Tipo yacimiento |     | Grado fragmentación |     | Dureza mineral |     | Tecnología conminución |     |
|-------------|-----------------|-----|---------------------|-----|----------------|-----|------------------------|-----|
|             | Frecuencia      | %   | Frecuencia          | %   | Frecuencia     | %   | Frecuencia             | %   |
| Muy bajo    | 0               | 0   | 0                   | 0   | 0              | 0   | 0                      | 0   |
| Bajo        | 0               | 0   | 0                   | 0   | 0              | 0   | 0                      | 0   |
| Medio       | 1               | 14  | 0                   | 0   | 2              | 29  | 0                      | 0   |
| Alto        | 4               | 57  | 2                   | 29  | 2              | 29  | 6                      | 86  |
| Muy Alto    | 2               | 29  | 5                   | 71  | 3              | 43  | 1                      | 14  |
| No responde | 0               | 0   | 0                   | 0   | 0              | 0   | 0                      | 0   |
| Total       | 7               | 100 | 7                   | 100 | 7              | 100 | 7                      | 100 |

Nota: Elaboración propia.

### 8.1.6. Otras consideraciones

Al final de la encuesta se incluyeron 5 preguntas complementarias sobre la implementación del *Mine to Mill*, de la 17 a la 22. Todos los encuestados respondieron

que recomendarían su implementación. Todos parecen estar convencidos de la utilidad del *Mine to Mill* aun cuando en uno de los casos ya no se sigue aplicando.

En relación a otras alternativas diferentes al trabajo integrado mina-planta 4 de 7 encuestados indicaron que, si evaluaron otras alternativas en especial el pre-chancado, sin embargo, fue descartada. Algunos consideran el pre-chancado dentro del concepto del *Mine to Mill*, para otros no tiene relación.

Frente a la pregunta si se tienen cuantificados otros beneficios ocultos, tales como mejora en el acarreo y carguío, 3 de 7 respondieron que sí, aunque solo uno indicó que tenía la evaluación completa. También se preguntó si basado en su experiencia pensaban que el *Mine to Mill* podría ser aplicado a todo tipo de mina. Al respecto las respuestas coincidieron que dependía del tipo de yacimiento y su geotecnia debido a que cada caso es particular. En general se consideró que es una oportunidad de mejora.

Finalmente, cuando se les preguntó por recomendaciones para incluir en este estudio (pregunta 22) indicaron dos ideas que podrían servir para futuras investigaciones:

- Extender las ideas de integración, no solo a la conminución, sino también la flotación e incluso llegar hasta la comercialización.
- Analizar el uso de la tecnología de información como pieza clave en el desarrollo del *Mine to Mill*, por ejemplo, la ayuda de simuladores.

## **8.2. Encuesta *Mine to Mill* – Proveedores**

En la presente sección se presentan los resultados obtenidos en la encuesta dirigida a los proveedores o consultores especializados en *Mine to Mill*. Se han agrupado en seis partes, empezando por la información general de los proyectos *Mine to Mill*, los

beneficios que trae, la continuidad del proyecto, los factores organizacionales, los factores técnicos y otras consideraciones y recomendaciones. Las características generales de la segunda encuesta, dirigida a los proveedores o consultores especializados en *Mine to Mill* se presentan a continuación.

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| <b>Objetivo del estudio:</b>         | Recolectar opiniones sobre la implementación y sostenibilidad del <i>Mine to Mill</i> .   |
| <b>Universo:</b>                     | Consultores y Proveedores de <i>Mine to Mill</i> .  |
| <b>Técnica de recolección:</b>       | Encuesta escrita vía e-mail.  |
| <b>Tamaño de muestra:</b>            | 9 personas.   |
| <b>Cuestionario:</b>                 | Estructurado.   |
| <b>Fecha en que se realizó:</b>      | Del 15 de noviembre al 15 de diciembre.   |
| <b>Anonimato y confidencialidad:</b> | Se garantiza el absoluto anonimato de las respuestas de los entrevistados que serán utilizados únicamente para el análisis de dicha encuesta. |

### 8.2.1. Información general

En esta sección se presentará información general sobre los proyectos *Mine to Mill* en los cuales participaron los consultores o proveedores encuestados.

**Años de ejecución.** Los consultores encuestados indicaron que dieron el servicio de *Mine to Mill* a nivel comercial entre el año 2000 y 2010. Sin embargo, uno de los encuestados participó en el desarrollo de la metodología desarrollada por JKTech en el año 1996 como parte del programa *AMIRA P483*. Como parte de este programa, hubo una conferencia *Mine to Mill* en 1998 que es uno de los casos elegidos.

**Promotor.** En relación a qué área hizo la solicitud de implementación de *Mine to Mill*, 4 de 9 dijeron la gerencia general y 3 de 9 la planta. La diferencia con los operadores podría explicarse que normalmente la empresa consultora se reúne con la gerencia general que se convierte en el dueño del proyecto.

**Mercado.** En relación al mayor mercado mundial de los estudios de *Mine to Mill* los consultores indicaron que el continente americano era el mayor mercado (6 de 9), además, 5 indicaron que el mercado de cobre era el más atractivo.

**Inversión.** En lo que respecta a cuánto costaron los servicios de implementar *Mine to Mill*, la cifra más frecuente está en US\$300mil, algo mayor que la cifra respondida por los operadores. Cuando se les preguntó si había sido necesario hacer mayores inversiones para la implementación (pregunta N° 27), no hubo consenso, 4 de 9 dijeron que sí y 5 de 9 que no.

**Duración.** En cuanto a la duración del proyecto casi todos indicaron que 12 meses o menos, resultado que coincide con los operadores.

### 8.2.2. Beneficios obtenidos

Todos los encuestados coinciden en que la implementación de la estrategia *Mine to Mill* debe traer como consecuencia en general un incremento de beneficios económicos el cual puede ser logrado por medio del incremento de tonelaje, reducción de los consumos energéticos y en general de los costos globales. A su vez esta implementación debe también entregar a la organización, las bases para una visión integradora que perdure en el tiempo (pregunta N° 6) y cimiente una cultura de trabajo integral y colaborativo.

Los principales compromisos que la empresa consultora de una implementación

*Mine to Mill* ofrece a sus clientes son:

- Incremento en los beneficios económicos.
- Incremento de tonelaje y reducción de la energía.
- Reducción de los costos globales \$/t.
- Visión de integración de procesos.

En cuanto a los beneficios cuantificables (tonelaje, energía, recuperación) producidos cuando se implementa de manera exitosa un *Mine to Mill*, el más frecuente que fue mencionado por todos los encuestados fue el incremento de tonelaje, que según sus respuestas fue de hasta 10% (44%), de hasta 20% (33%) y de hasta 30% (22%), según se puede observar en la tabla 41. El segundo beneficio mencionado por todos los encuestados fue la reducción de hasta un 10% de energía en un 67% de los casos, los otros encuestados reportaron reducciones de hasta 20% y 30%, en 22% y 11% respectivamente. Ver tabla 46 con las respuestas a la pregunta N° 7.

*Tabla 46.* Resultados encuesta a proveedores pregunta 7 (beneficios).

| Criterio      | Incremento tonelaje |     | Reducción energía |     | Incremento recuperación |     |
|---------------|---------------------|-----|-------------------|-----|-------------------------|-----|
|               | Frecuencia          | %   | Frecuencia        | %   | Frecuencia              | %   |
| De 0 a < 10%  | 4                   | 44  | 6                 | 67  | 6                       | 67  |
| De 10 a < 20% | 3                   | 33  | 2                 | 22  | 0                       | 0   |
| De 20 a < 30% | 2                   | 22  | 1                 | 11  | 0                       | 0   |
| Igual o >30%  | 0                   | 0   | 0                 | 0   | 0                       | 0   |
| No responde   | 0                   | 0   | 0                 | 0   | 3                       | 33  |
| Total         | 9                   | 100 | 9                 | 100 | 9                       | 100 |

*Nota:* Elaboración propia.

A manera de síntesis, las conclusiones sobre los beneficios obtenidos en los proyectos estudiados son:

- a. **Tonelaje.** Normalmente el beneficio en tonelaje es menor al 10%, a veces se ha tenido incrementos de hasta 18% pero con trabajo conjunto de optimización de molienda. En caso se dé un porcentaje más alto, puede ser que la operación se encontrara muy lejos del óptimo. Hay que tomar en cuenta que, si se enfoca únicamente en incremento de tonelaje, el *Mine to Mill* tiende a producir granulometrías más gruesas a flotación en perjuicio de la recuperación.
- b. **Energía.** En los *Mine to Mill* bien evaluados no se tiene altos beneficios económicos en energía dado que el mayor tonelaje procesado implica muchas veces gastos adicionales de energía en molienda de bolas. Como en general el *Mine to Mill* se enfoca en incrementar tonelaje, no se ve reducción del consumo de energía global (kw-h/día). Por el contrario, si es visible una reducción del consumo de energía específico en la etapa SAG (kw-h/t).
- c. **Recuperación.** Las mejoras en recuperación son mínimas y en algunos casos de cero, a menos que se cuente con equipos adicionales. En general, la recuperación depende de cuánto trabajo se haga en la optimización del producto de molienda. Por ello, la recuperación tiende a caer ya que los *Mine to Mill* tienden a producir productos más gruesos a flotación.

Es importante anotar que los consultores son más drásticos que los operadores en identificar los beneficios que se pueden o no esperar del proyecto debido a los *trade off* entre las tres variables: tonelaje, energía y recuperación.

### 8.2.3. Sostenimiento o continuidad

Cuando se les preguntó qué porcentaje de sus clientes tienen éxito en el sostenimiento o la continuidad del *Mine to Mill* en el largo plazo (pregunta N° 8) la respuesta más frecuente de 5 de los 9 encuestados (56%) fue menos del 20%. Se entiende largo plazo a un periodo mayor a 5 años. Esto difiere a las respuestas de los operadores que fueron más optimistas. Probablemente la respuesta se debe a que la implementación de *Mine to Mill* aún es joven en el Perú, de este modo, las respuestas de los operadores no tienen el panorama al largo plazo de la que sí tienen los consultores.

Tabla 47. Resultados encuesta a proveedores pregunta 8 (sostenimiento o continuidad)

| Criterio      | Frecuencia | %   |
|---------------|------------|-----|
| Menos del 20% | 5          | 56  |
| De 20 a < 50% | 3          | 33  |
| De 50 a < 75% | 0          | 0   |
| De 75 a 100%  | 1          | 11  |
| No responde   | 0          | 0   |
| Total         | 9          | 100 |

Nota: Elaboración propia.

Las explicaciones que dieron para explicar esta baja tasa de continuidad del proyecto se resumen a continuación.

- a. **Falta de conocimiento del proceso integrado.** Los consultores indicaron que los *Mine to Mill* fracasan debido a las sobre expectativas que se derivan de un pobre conocimiento del proceso integral y de los *trade off* existentes entre las variables en juego. No es suficiente con incrementar la voladura y chancar más intensamente. Todo el circuito debe estar preparado para asumir los posibles cuellos de botella que se generaran.

- b. No implementar un cambio en la cultura organizacional.** El *Mine to Mill* tiene un enfoque de integración de los procesos de mina y planta. Ello requiere que se acepte este proyecto como una propuesta de cambio de la cultura de trabajo que debe pasar de los compartimientos estancos a un enfoque de trabajo conjunto mina-planta. Casi ninguna mina ha sido capaz de mantener los beneficios iniciales del *Mine to Mill* al no poder lograr que este se vuelva parte de la cultura de la organización. Esto se hace notorio cuando hay cambios de gerentes que impulsaron el proyecto y no existe el compromiso de personal clave para continuar con este enfoque integral que implica el *Mine to Mill*. Lo que pasa normalmente es que se tiene una o dos personas que se encargan en la mina del *Mine to Mill*, las cuales se especializan. Se han mencionado casos que estas personas dejan la organización y el *Mine to Mill* queda abandonado.
- c. Variabilidad del mineral.** La variabilidad del mineral en el tiempo hace complicado mantener los mismos parámetros fijados en el estudio inicial. Solamente se tiene éxito cuando se tiene un *Mine to Mill* hecho en base al *LOM* y que contemple escenarios que incluyan la variabilidad del material. Una de las variabilidades más críticas es la de la dureza. Los modelos de bloques que normalmente se tienen solo consideran atributos como la ley, recuperación y litología sin contener una buena resolución en lo que es dureza.
- d. Presupuesto.** Otro factor que condiciona el fracaso de los *Mine to Mill* en el tiempo se debe a cortes en los presupuestos originados también por la falta de una

mirada integral del proceso, Así, por ejemplo, la mina reduce los costos de perforación y voladura sin coordinar con la planta.

- e. **Medición de los beneficios.** Dado que los beneficios del *Mine to Mill* son fácilmente medibles, estas mediciones deberían estar disponibles en todo el proceso para tomar medidas correctivas. Por ejemplo, el tonelaje se puede medir el antes y el después. Lo mismo con el consumo de energía específico y los costos operacionales.

#### **8.2.4. Factores críticos de éxito**

A manera de reforzar algunos resultados de la sostenibilidad o continuidad del proyecto, las preguntas 14 a 17 se han agrupado para identificar los factores críticos de éxito para la implementación del *Mine to Mill*, que surgen de los comentarios que los proveedores expertos hicieron sobre los proyectos que implementaron.

La síntesis de los factores que facilitaron el éxito, en opinión de los expertos son:

- Apoyo de la alta gerencia, que tiene plena conciencia de los buenos resultados que se obtienen de la gestión integrada. Trabajar la gestión del cambio, motivando y entusiasmando al personal y manteniendo al personal involucrado.
- Inclusión de la filosofía de gestión integrada dentro de la cultura organizacional y dentro de procedimientos establecidos.
- Indicadores que permitan el monitoreo constante de las condiciones de mineral y de los procesos para ir haciendo los ajustes respectivos.

En relación a los fracasos de proyectos *Mine to Mill*, de acuerdo a los proveedores expertos éstos son en su mayoría por factores técnicos y también se tiene la otra cara de la moneda de los factores positivos, fraseados en negativo. De acuerdo a los encuestados, las fallas en la sostenibilidad del *Mine to Mill* se deben a:

- Proveedores poco competentes con mala metodología de implementación y denotan falta de conocimiento que se refleja en recomendaciones erróneas.
- Operaciones que han estado muy cerca a lo óptimo en referencia a fragmentación.
- Factores personales, políticos, intereses particulares, etc. Partida de la empresa de la persona impulsora.
- La falta de los factores que originaron resultados positivos: falta de compromiso de la alta gerencia, no darse cuenta que requiere un cambio de cultura y de procedimientos operativos y falta de indicadores adecuados que no faciliten el monitoreo.

Cuando se les preguntó sobre casos puntuales que sirvan como referente o mejores prácticas para el *Mine to Mill*, las empresas mencionadas fueron Antamina, Batu Hiaju, Highland Valley Copper, Barrick, Paddington obviamente dentro del universo de resultados publicados.

Finalmente, en la pregunta N° 17 se les preguntó si había una mayor tasa de éxito en alguna zona en particular del mundo. Se indicaron los siguientes:

Australia por la experiencia ganada de décadas en la metodología.

Latinoamérica (Chile en particular) y Canadá en operaciones de gran minería.

Zonas en cualquier parte del mundo donde los estándares de operación son altos debido a la presencia de operaciones grandes, con recursos para invertir en optimización, tienen potenciales mayores de beneficio con *Mine to Mill*.

### 8.2.5. Factores organizacionales

Las respuestas a la pregunta de cuánto influyen los factores organizacionales en el éxito o fracaso en la implementación de la estrategia del *Mine to Mill* coincide con las respuestas de los operadores. En primer lugar, indicaron que “el liderazgo del gerente general” y el “trabajo en equipo mina-planta” fueron los factores más importantes. El tercer factor fue “el desalineamiento de los indicadores entre gerencias” y el cuarto factor fue “resistencia al cambio”.

Tabla 48. Resultados encuesta a proveedores pregunta 9.

| Criterio    | 1          |     | 2          |     | 3          |     | 4          |     | 5          |     | 6          |     | 7          |     |
|-------------|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|
|             | Frecuencia | %   |
| Muy bajo    | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 2          | 22  | 1          | 11  | 1          | 11  |
| Bajo        | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 1          | 11  | 1          | 11  | 2          | 22  | 3          | 33  |
| Medio       | 1          | 11  | 1          | 11  | 2          | 22  | 2          | 22  | 4          | 44  | 4          | 44  | 4          | 44  |
| Alto        | 3          | 33  | 4          | 44  | 4          | 44  | 3          | 33  | 1          | 11  | 0          | 0   | 1          | 11  |
| Muy alto    | 5          | 56  | 4          | 44  | 3          | 33  | 3          | 33  | 1          | 11  | 2          | 22  | 0          | 0   |
| No responde | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   |
| Total       | 9          | 100 | 9          | 100 | 9          | 100 | 9          | 100 | 9          | 100 | 9          | 100 | 9          | 100 |

Nota: Elaboración propia. <sup>1</sup>Liderazgo Gerencia General. <sup>2</sup>Trabajo en equipo Mina – Planta.

<sup>3</sup>Desalineamiento de los KPI entre gerencias. <sup>4</sup>Resistencia al cambio. <sup>5</sup>Dificultad para medir los beneficios.

<sup>6</sup>Cultura organizacional. <sup>7</sup>No contar con un departamento de integración Mina – Planta].

Los comentarios fueron:

- a. **Trabajo en equipo y organización.** El trabajo en equipo puede facilitarse si se modifica la estructura organizacional y se nombra un jefe de equipo, responsable directo de la integración entre mina y planta. Este jefe debe contar con el total apoyo de la alta gerencia. El trabajo del equipo *Mine to Mill* no solo debe enfocarse en los explosivos sino en la mutua dependencia entre los diversos parámetros del proceso integral, un enfoque parcial le hace perder el valor para el

- cliente que espera el resultado final del proceso y no los resultados parciales de los sub-procesos aislados. Asimismo, tomar en cuenta que el fomentar el valor del trabajo colaborativo e integrado es parte de un esfuerzo de cambio de cultura del individualismo hacia el trabajo integrado.
- b. Desalineamiento de indicadores.** El principal problema viene de la naturaleza humana que tiende a propulsar indicadores del proceso que controla o está a su cargo, evitando asumir otros indicadores que “son de otros”. Proponer un enfoque integral de la mina y la planta permitiría definir cuáles son los resultados conjuntos que la empresa necesita. La dificultad para medir los beneficios de manera tangible también afecta, dado que no se puede aislar los múltiples factores que intervienen para lograr los resultados, determinar con exactitud cuáles fueron los beneficios del *Mine to Mill* lo cual hace que no se cumplan las expectativas de algunos grupos de interés.
- c. Cultura organizacional.** Lo que sí podría llamar la atención en un primer momento es que “la cultura organizacional” no haya sido priorizado como factor que afecta la implementación. Sin embargo, ha sido mencionados como factor que afectan directamente a la continuidad en el tiempo del *Mine to Mill*. En primer lugar, como se mencionó líneas arriba, el hecho de considerar el trabajo colaborativo e integrado como un factor está relacionado a la cultura organizacional ya que se requiere fomentar el valor de esta forma de trabajo. En segundo lugar, otra explicación de esta aparente contradicción estaría en el hecho que la implementación dura menos de un año y durante ese periodo están los

consultores apoyando en la tarea de integración mientras que en la continuidad futura sí se afecta porque si no se enraíza la cultura de trabajo integrado y colaborativo en la empresa, la posibilidad que el proyecto fracasase es alta cuando ya no haya dicho apoyo externo. Cuando se hace la misma pregunta relacionada a los factores organizacionales pero esta vez relacionados a la continuidad o sostenimiento del proyecto, existe mucha dispersión entre los impactos asignados a los factores organizacionales y la tasa de no respuesta es bastante alta como se observa en la tabla 49 (pregunta 10).

*Tabla 49. Resultados encuesta a proveedores pregunta 10.*

| Criterio    | 1          |     | 2          |     | 3          |     | 4          |     | 5          |     | 6          |     | 7          |     |
|-------------|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|
|             | Frecuencia | %   |
| Muy bajo    | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 1          | 11  | 0          | 0   | 0          | 0   |
| Bajo        | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 1          | 11  | 0          | 0   | 1          | 11  | 0          | 0   |
| Medio       | 0          | 0   | 1          | 11  | 1          | 11  | 3          | 33  | 3          | 33  | 1          | 11  | 4          | 44  |
| Alto        | 1          | 11  | 2          | 22  | 2          | 22  | 0          | 0   | 0          | 0   | 2          | 22  | 0          | 0   |
| Muy alto    | 3          | 33  | 1          | 11  | 1          | 11  | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   |
| No responde | 5          | 56  | 5          | 56  | 5          | 56  | 5          | 56  | 5          | 56  | 5          | 56  | 5          | 56  |
| Total       | 9          | 100 | 9          | 100 | 9          | 100 | 9          | 100 | 9          | 100 | 9          | 100 | 9          | 100 |

*Nota:* Elaboración propia. <sup>1</sup>Liderazgo Gerencia General. <sup>2</sup>Trabajo en equipo Mina – Planta. <sup>3</sup>Desalineamiento de los KPI entre gerencias. <sup>4</sup>Resistencia al cambio. <sup>5</sup>Dificultad para medir los beneficios. <sup>6</sup>Cultura organizacional. <sup>7</sup>No contar con un departamento de integración Mina – Planta].

Otro factor organizacional proviene del hecho que dos o más gerencias participen en la implementación, en la pregunta 12 se les preguntó si este factor afectaba a la continuidad del proyecto en el largo plazo. También en ese caso las respuestas fueron muy dispersas, aunque las no respuestas fueron menores que en la pregunta anterior (22% no responde), solo dos encuestados indicaron que los factores organizacionales u operacionales eran de alta importancia como se observa en la Tabla N° 50.

Tabla 50. Resultados encuesta a proveedores pregunta 12 (participación de dos gerencias).

| Criterio    | Organizacionales |     | Operacionales |     | Económicos |     | Técnicos   |     |
|-------------|------------------|-----|---------------|-----|------------|-----|------------|-----|
|             | Frecuencia       | %   | Frecuencia    | %   | Frecuencia | %   | Frecuencia | %   |
| Muy bajo    | 0                | 0   | 0             | 0   | 0          | 0   | 2          | 22  |
| Bajo        | 2                | 22  | 1             | 11  | 4          | 44  | 2          | 22  |
| Medio       | 3                | 33  | 4             | 44  | 3          | 33  | 2          | 22  |
| Alto        | 2                | 22  | 2             | 22  | 0          | 0   | 1          | 11  |
| Muy Alto    | 0                | 0   | 0             | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   |
| No responde | 2                | 22  | 2             | 22  | 2          | 22  | 2          | 22  |
| Total       | 9                | 100 | 9             | 100 | 9          | 100 | 9          | 100 |

Nota: Elaboración propia.

A manera de síntesis presentamos los comentarios a los factores organizacionales que afectan la continuidad del proyecto de parte de los encuestados:

- d. Objetivos claros e indicadores definidos.** En general las gerencias siempre están claras sobre los objetivos y metas de su área y del resultado global del negocio; sin embargo, los objetivos e indicadores conjuntos, que son la esencia del *Mine to Mill*, cuyos resultados dependen del trabajo en equipo y de los esfuerzos conjuntos con otras áreas no son fácilmente aceptados. Los indicadores deben ser claros en cuanto a las responsabilidades y deben ser comunicados e internalizados por todas las partes tradicionalmente acostumbradas a “sus propios indicadores”. La tradicional rivalidad para ser la mejor área tiene que dar paso a una cultura de trabajo integral para lograr mejores resultados para todos; a veces, sacrificando indicadores que antes eran indicadores de logro de alguna de las áreas, en aras al resultado del equipo, compartido por todos. Si no se entiende este enfoque integrador y la necesidad del cambio de la cultura, el proyecto no tendrá futuro.

Otra de las preguntas a los consultores de *Mine to Mill* fue la pregunta N° 13. en la que se les pedía recomendaciones para mejorar la implementación del proyecto y mencionar casos de éxito.

Las soluciones propuestas por los encuestados eran de carácter organizacional, como se detalla a continuación:

- e. Idoneidad de los indicadores.** Los indicadores del proyecto deben estar bien establecidos que reflejen la performance de toda la operación, es decir incluir indicadores más globales.
- f. Entrenamiento al personal.** Se debe implementar entrenamiento al personal para que entienda los aspectos de la operación integrada a mayor detalle. La mina debe entender a la planta y viceversa, para ello se puede incluir una opción de intercambio y rotación de personal para generar empatía con el trabajo del otro.
- g. Equipos de trabajo interdisciplinarios.** Otra forma de facilitar la continuidad del proyecto es formar equipos interdisciplinarios que gestionen el *Mine to Mill*, no solo personas de la planta deben hacerse cargo.
- h. Apoyo de la alta gerencia.** El principal promotor del trabajo conjunto y de los beneficios de la gestión integrada es el gerente general, si se involucra, tiene un efecto integrador y da señas que el proyecto es importante para la empresa.

#### **8.2.6. Factores técnicos**

En esta sección se integran todas las preguntas que abordan aspectos técnicos relacionados a la implementación y sostenimiento del *Mine to Mill*. Estas preguntas difieren de las que se hicieron a los operadores debido a que los encuestados habían

implementado como consultores varios proyectos y por lo tanto tienen una visión global de este enfoque integrador entre mina y planta. Los aspectos técnicos analizados son ocho: riesgos en la voladura, la tecnología de conminución empleada, el tipo de yacimiento, el tipo de mineral, el uso en minería subterránea, el tamaño de la mina, la dureza del mineral y el impacto de la fragmentación.

- a. Riesgos asociados a la voladura.** Cuando se preguntó (Pregunta N° 11) en qué medida los riesgos asociados a la voladura (deslizamientos de tierra, inestabilidad geotécnica, etc.) influyeron en la implementación y la sostenibilidad de *Mine to Mill*, 7 de 9 (77%) respondieron que influyeron en baja o muy baja medida en la implementación y 4 de 9 (44%) en el sostenimiento o continuidad del proyecto. Las respuestas estaban dispersas en casi toda la escala desde muy alto hasta muy bajo. Esta dispersión es similar a la encontrada en los operadores. Ver la tabla 51.

*Tabla 51.* Resultados encuesta a proveedores pregunta 11 (riesgos en voladura)

| Criterio    | Implementación |     | Sostenimiento |     |
|-------------|----------------|-----|---------------|-----|
|             | Frecuencia     | %   | Frecuencia    | %   |
| Muy bajo    | 0              | 0   | 1             | 11  |
| Bajo        | 3              | 33  | 2             | 22  |
| Medio       | 4              | 44  | 2             | 22  |
| Alto        | 1              | 11  | 3             | 33  |
| Muy Alto    | 1              | 11  | 1             | 11  |
| No responde | 0              | 0   | 0             | 0   |
| Total       | 9              | 100 | 9             | 100 |

*Nota:* Elaboración propia.

Acerca de la influencia de los riesgos asociados a la voladura en la implementación y sostenibilidad, de las respuestas y comentarios recibidos se puede concluir que, para los consultores y proveedores, los aspectos geotécnicos pueden ser manejados y no debería ser una variable definitiva que dificulte la implementación del *Mine to Mill*, esto a diferencia de la opinión de los operadores

para quienes los aspectos geotécnicos eran cruciales. A continuación, a manera de ilustración, ponemos los principales comentarios recibidos de los expertos:

- **Seguridad.** Como todas las minas privilegian la seguridad, existe el temor de estar sacrificando seguridad por los beneficios de un incremento de tonelaje. Esto se debe a la falta de conocimiento técnico que induce a realizar voladuras demasiado conservadoras. Con un buen entrenamiento técnico esto puede ser manejado sin sacrificar seguridad.
  - **Riesgos geotécnicos.** *Mine to Mill* se basa en estrategias operacionales que parten del análisis de la roca. La energía de los explosivos se basa en estas propiedades y además en las necesidades del proceso aguas abajo pero siempre teniendo en cuenta las condiciones geotécnicas. No hay necesidad de incrementar energía siempre. Muy frecuentemente los riesgos geotécnicos pueden ser mitigados, pero son usados como una barrera para el cambio. Como parte del estudio se realiza control de las vibraciones para medir el impacto de la alta intensidad en la estabilidad geotécnica.
- b. Tecnología de conminución.** En la pregunta N° 18 se consultó si la elección de tecnología influye en los resultados. Es decir, si los beneficios esperados cambiarían si son plantas que usan molienda convencional, *SAG* o *HPGR*. Referente a la tecnología de conminución, los encuestados contestaron que principalmente es aplicado con la tecnología *SAG*, dado que en otras plantas se amortigua el efecto en las etapas de chancado. La operación del *SAG* es muy

sensible a los cambios de dureza y de fragmentación. En otras tecnologías como *HPGR* y chancado la operación es más estable y las mejoras más discretas.

Aunque aclararon que conceptualmente se puede aplicar a cualquier tecnología dado que se realizan modelos matemáticos adecuados a cada realidad.

- c. Tipo de yacimiento.** Se les consultó (pregunta N° 19) si el tipo de yacimiento influye en los resultados. Es decir, si los beneficios esperados cambiarían para yacimientos tipo pórfido, skarn, VMS, IOGC, entre otros.

Referente al tipo de yacimiento y su influencia en *Mine to Mill* los expertos indicaron que el *Mine to Mill* es altamente beneficioso para minerales competentes y de alta dureza sin importar el yacimiento. Además, indicaron que los yacimientos con mayor variabilidad son los que más se benefician con el *Mine to Mill*.

- d. Tipo de mineral.** Se hizo la consulta (pregunta N° 20) si el tipo de mineral influye en los resultados. Es decir, si los beneficios esperados cambiarían si explota Hierro, Oro ó Cobre. Las respuestas fueron que no influye, solo las propiedades de la roca. Si la roca es competente no importa si es oro, cobre, etc. Aunque, en el mundo la mayor tendencia es aplicarlo en las operaciones de cobre y oro debido al tamaño de las operaciones.

- e. Empleo en minería subterránea.** Se les consultó (preguntas N° 21 y 22) si se puede implementar el *Mine to Mill* en minas subterráneas y qué objetivo buscarían. La respuesta fue afirmativa de parte de 8 de los 9 encuestados. La filosofía *Mine to Mill* es aplicable debido a que no solo enfoca a la fragmentación,

sino también involucra aspectos del conocimiento mina y planta. La selección de los bloques de voladura en la mina ya es un ejemplo de *Mine to Mill*. Otros consultores indicaron que es mayormente aplicable al método de cámaras y pilares donde se tiene control de la voladura. En otros métodos como hundimiento de bloque se harían muy difícil. Otro consultor indicó que tendría que orientarse diferente dado que el costo de minado en una mina subterránea es muy alto en comparación de planta. En su opinión habría que orientarlo a disminuir el costo del minado manteniendo la productividad.

En relación al objetivo del *Mine to Mill* en las minas subterráneas los consultores indicaron que es el mismo, la mejora de fragmentación. Otros indicaron que depende del cliente, puede ser reducción de costos y no sacrificar productividad.

- f. Tamaño de plantas.** En la pregunta N° 23 se les consultó si conviene la implementación del estudio para plantas pequeñas (menores a 5000 thp). Respecto a la aplicación en plantas pequeñas la mayoría de los encuestados (8 de 9) manifestaron que si es aplicable. Aunque también indicaron que las plantas pequeñas tienen mayor restricción de capital, por lo tanto, la aplicación de *Mine to Mill* debe ser de acuerdo a evaluación técnico económica. Asimismo, acotaron que las plantas pequeñas operan en rangos de operación más limitados, por lo tanto, la aplicación de *Mine to Mill* puede orientarse a otro enfoque como la reducción de energía o costos. También acotaron que en las plantas pequeñas hay muchas oportunidades de optimización mediante la integración mina-planta ya que usualmente corren fuera del óptimo.

- g. Dureza del mineral.** Se les preguntó cuál es el impacto de la dureza del mineral en los siguientes procesos en la implementación del *Mine to Mill* (pregunta 24). De todos los impactos el mayor fue en la “capacidad de planta” ya que todos los encuestados indicaron que el impacto era alto y muy alto. Los siguientes impactos fueron en la perforación y en la voladura, ya que en ambos 5 de los encuestados indicaron que era alto o muy alto impacto.

*Tabla 52.* Resultados encuesta a proveedores pregunta 24 (efecto de la dureza).

| Criterio    | Perforación |     | Voladura   |     | Carguío    |     | Acarreo    |     | Capacidad de planta |     |
|-------------|-------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|---------------------|-----|
|             | Frecuencia  | %   | Frecuencia | %   | Frecuencia | %   | Frecuencia | %   | Frecuencia          | %   |
| Muy bajo    | 0           | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 2          | 22  | 0                   | 0   |
| Bajo        | 0           | 0   | 0          | 0   | 1          | 11  | 2          | 22  | 0                   | 0   |
| Medio       | 3           | 33  | 3          | 33  | 1          | 11  | 0          | 0   | 0                   | 0   |
| Alto        | 3           | 33  | 2          | 22  | 3          | 33  | 1          | 11  | 4                   | 44  |
| Muy Alto    | 2           | 22  | 3          | 33  | 1          | 11  | 1          | 11  | 5                   | 56  |
| No responde | 1           | 11  | 1          | 11  | 3          | 33  | 3          | 33  | 0                   | 0   |
| Total       | 9           | 100 | 9          | 100 | 9          | 100 | 9          | 100 | 9                   | 100 |

*Nota:* Elaboración propia.

- h. Fragmentación.** En las preguntas 25 y 26 se preguntaron dos aspectos de la fragmentación, en la primera se preguntó sobre el impacto de la mayor fragmentación del mineral en los siguientes procesos en la implementación del *Mine to Mill* (pregunta 25), en la segunda se preguntó sobre las limitaciones que existen al uso de mayor cantidad de explosivos en la fragmentación (pregunta 26). De todos los impactos el mayor fue en la planta ya que 8 de 9 (88%) indicaron que el impacto era alto y muy alto. Los siguientes impactos de la fragmentación son en el carguío, 6 de 9, y en el acarreo, 4 de 9. Ver tabla N° 53.

**Tabla 53.** Resultados encuesta a proveedores pregunta 25 (fragmentación)

| Criterio    | Carguío    |     | Acarreo    |     | Desgaste equipo |     | Planta     |     |
|-------------|------------|-----|------------|-----|-----------------|-----|------------|-----|
|             | Frecuencia | %   | Frecuencia | %   | Frecuencia      | %   | Frecuencia | %   |
| Muy bajo    | 0          | 0   | 0          | 0   | 0               | 0   | 0          | 0   |
| Bajo        | 1          | 11  | 2          | 22  | 0               | 0   | 0          | 0   |
| Medio       | 0          | 0   | 1          | 11  | 5               | 56  | 0          | 0   |
| Alto        | 3          | 33  | 2          | 22  | 1               | 11  | 4          | 44  |
| Muy Alto    | 3          | 33  | 2          | 22  | 0               | 0   | 4          | 44  |
| No responde | 2          | 22  | 2          | 22  | 3               | 33  | 1          | 11  |
| Total       | 9          | 100 | 9          | 100 | 9               | 100 | 9          | 100 |

*Nota:* Elaboración propia.

En relación a las restricciones para el uso de mayores cantidades de explosivos en la fragmentación, 5 de 7 respuestas indicaron que la “geotécnia” y el “costo de voladura” son los factores que lo afectan, como se puede ver en la tabla N° 54.

**Tabla 54.** Resultados encuesta a proveedores pregunta 26 (mayor cantidad de explosivos).

| Criterio    | Geotécnia  |     | Acarreo    |     | Costo voladura |     |
|-------------|------------|-----|------------|-----|----------------|-----|
|             | Frecuencia | %   | Frecuencia | %   | Frecuencia     | %   |
| Muy bajo    | 0          | 0   | 0          | 0   | 0              | 0   |
| Bajo        | 1          | 14  | 2          | 29  | 0              | 0   |
| Medio       | 1          | 14  | 5          | 71  | 2              | 29  |
| Alto        | 0          | 0   | 0          | 0   | 4              | 57  |
| Muy Alto    | 5          | 71  | 0          | 0   | 1              | 14  |
| No responde | 0          | 0   | 0          | 0   | 0              | 0   |
| Total       | 7          | 100 | 7          | 100 | 7              | 100 |

*Nota:* Elaboración propia.

### 8.2.7. Otras consideraciones

Se hizo la pregunta sobre la percepción que se tiene del Perú como mercado para *Mine to Mill*, (pregunta 28), a la cual 7 encuestados respondieron que sí y 2 que es un mercado de nivel medio. Las opiniones dadas se pueden resumir en la idea de que Perú tiene minas de gran tonelaje y que tienen ya la filosofía *Mine to Mill* asentada de manera exitosa lo cual favorece el mercado. Mientras que, por otro lado, aún estás operaciones de gran volumen son pocas y sus equipos de trabajo no son muy técnicos lo cual es desfavorable para el mercado.

Otra interrogante planteada fue sobre la valoración de los beneficios del *Mine to Mill* con referencia a huella de carbono (pregunta 29). 5 encuestados respondieron afirmativamente y 4 de manera negativa, dando como comentario que este tipo de valoraciones se realizan más en Australia donde se tiene incentivos económicos al respecto. Uno de ellos opinó que estos temas tienen más tinte político.

El tema de pre-chancado como posibilidad de reemplazo de *Mine to Mill* también fue consultado (pregunta 30). 8 de los 9 encuestados afirmaron haber evaluado la opción de pre chancado. Las opiniones que brindaron se resumen en que el pre-chancado es una buena opción, pero que implica gastos de capital y que debe ser implementado si se tiene fallas de diseño en la capacidad del SAG o se efectúa una ampliación o *debottlenecking*. Una buena medida es que se considere junto con la optimización de la fragmentación-

En las implementaciones de *Mine to Mill* se tiene beneficios ocultos que son de difícil cuantificación. El beneficio en el acarreo es uno de ellos. A la pregunta 31, 8 de los 9 encuestados afirmaron haberlos considerados e incluso se tuvo una opinión que a veces el beneficio en la velocidad de acarreo es una motivante para el *Mine to Mill*.

Otro tema que requiere bastante análisis es el referido a la aplicabilidad del *Mine to Mill* a todas las minas. En la pregunta 32, 6 de los 9 encuestados afirman que sí. Las opiniones son divididas, por un lado, se tiene opiniones que afirman que sí, que la integración siempre es buena y que siempre habrá un positivo de tonelaje que la justifique, mientras otros afirman que solo podrán ver los beneficios en caso de minerales duros y plantas que estén lejos del óptimo.

Como ideas finales para agregar, los encuestados afirmaron que la integración debe extenderse e ideas como *Mine to Port*, *Mine to Tail* necesitan ser más desarrolladas. También que tecnologías más recientes como el *Ore Sorting* deben ser consideradas. Por último, las empresas que usan contratistas para realizar su voladura deben incluir términos de *Mine to Mill* en sus contratos.

## Capítulo 9

### Resultados de las variables técnicas y organizacionales que afectan la ejecución

De acuerdo a las opiniones recogidas en las encuestas los principales factores técnicos y organizacionales que atentan contra la implementación y mantención del *Mine to Mill* son:

#### 9.1. Factores técnicos

##### a. Geotecnia

Los resultados de las encuestas nos dicen que la gran limitante técnica de la aplicación del *Mine to Mill* son los riesgos geotécnicos que la mayor voladura genera. Mayor nivel de vibración reduce la estabilidad de los taludes. Esto es especialmente cierto donde se tienen factores que favorecen la inestabilidad tales como presencia en alta cantidad de agua freática. Previa a la implementación se necesita hacer un estudio de la voladura y diseñarla de acuerdo a las características de la roca. Durante la etapa de prueba se debe monitorear las vibraciones que se da a mayores factores de potencia.

Los diseños de la voladura implican que se considere factores de potencia menores a las zonas contiguas a los taludes y un mayor factor de potencia en las zonas de núcleo de mina. Aún con todas estas consideraciones, el factor geotécnico seguirá siendo el de mayor peso en la implementación y sostenibilidad.

**b. Variabilidad del mineral**

El mineral cambia a lo largo de la vida de la mina. Muchas veces los *Mine to Mill* son diseñados para el mineral de hoy. Otras veces es muy difícil usar las pruebas hechas hoy para extrapolar el efecto de un mayor factor de potencia en 5, 10 o 15 años. Algunos proveedores pueden entregarte un *Mine to Mill* diseñado para el *LOM*<sup>21</sup>.

Esta es una de las principales causas de fracaso en el largo plazo del *Mine to Mill*. Dada la realidad y los beneficios económicos del *Mine to Mill* es conveniente que la empresa invierta recursos en su actualización. Debería considerarse una revisión del diseño del *Mine to Mill* cada dos años o cada tiempo que la empresa considere pertinente. La actualización de los factores de potencia a las nuevas necesidades es algo que puede dar muchos beneficios y no es necesario que un consultor lo realice; puede realizarse hasta con recursos propios.

**c. Tecnología de conminución**

El *Mine to Mill* es mejor aprovechado en unidades que cuenten con molienda *SAG*, esto es debido a la alta dependencia del mineral con el tamaño de alimento en este tipo de tecnología. En *HPGR* se han visto beneficios menores.

**d. Tipo de minado**

*Mine to Mill* puede ser aplicado en minas cielo abierto y subterráneas, pero con una variación en el enfoque y ciertas limitaciones en la metodología de minado.

---

<sup>21</sup>*LOM (Life of Mine)*, es el cálculo de la vida útil restante de las minas en base a las reservas probadas y probables más los recursos inferidos.

Mientras que, en las minas de cielo abierto, *Mine to Mill* se orienta a aumentar la capacidad de procesamiento, en el caso de las minas subterráneas el *Mine to Mill* no iría tan orientado a subir tonelaje dado que subir los factores de potencia en minas subterráneas es bien crítico. En este caso se orientaría a temas de mejorar la dilución, mejorar los costos, etc.

**e. Tipo de yacimiento y tipo de metal**

Los resultados de las encuestas nos muestran que los resultados obtenidos en *Mine to Mill* son indistintos para el tipo de yacimiento o metal, estos solo dependen de la dureza de la roca. La dureza resulta ser muy importante en la magnitud del beneficio obtenido por *Mine to Mill*, siendo que para yacimientos de mayor dureza se observan mayores beneficios por lo que favorece su continuidad en el largo plazo.

**f. Dificultad de cuantificar los beneficios**

Es difícil de cuantificar los beneficios del *Mine to Mill* cuando se tiene tantos factores que pueden afectar la medición en el periodo de evaluación (dureza del mineral; estado de los forros del molino, etc) entre otros.

La principal variable a medir en la implementación de un *Mine to Mill* es la granulometría de ingreso a la planta. La implementación de un Sistema *Split*<sup>22</sup> es una excelente herramienta para quienes quieren implementar *Mine to Mill*.

Además del control en tiempo real de la planta, ayuda a ver las variaciones de

---

<sup>22</sup> Sistema *Split*, se basa en el análisis digital de imágenes y proporciona una estimación de la medida de la fragmentación.

granulometría producto de una voladura más intensiva. Si bien durante la etapa de las pruebas del *Mine to Mill* se hacen muestreos verificados, estos son información puntual de ese día que para efecto de evaluaciones más largas no se puede considerar.

**g. Temas operacionales**

La dificultad de poner en práctica el *Mine to Mill* también puede limitar su aceptación. Presencia de partículas emitidas durante la voladura; excesivo nivel de vibración en zonas aledañas donde se tiene monitoreo de las autoridades gubernamentales, también son factores que deben tomarse en cuenta.

**9.2. Factores organizacionales**

La implementación de una estrategia de gestión integrada de energía requiere de un gran trabajo en materia de coordinaciones y acuerdos. El gran reto del *Mine to Mill* no es demostrar que existe una ganancia económica en su implementación. El gran reto que tiene es lograr hacer conciliar a dos partes que normalmente tienen agendas separadas en muchos temas. Las principales dificultades operacionales son:

**a. Falta de compromisos con la integración de parte de la Gerencia General**

Dado que el *Mine to Mill* es una estrategia cuya implementación requiere la decisión de Gerentes tanto de mina como de planta, es necesario que la alta gerencia esté al tanto de los beneficios y se comprometa al 100%.

Considerando la realidad, muchas veces las Gerencias Generales no son muy conscientes de los beneficios que esto aporta por lo tanto no brindan el apoyo necesario al proyecto en su implementación y mantención. Esto genera que el

*Mine to Mill* se vea como una iniciativa aislada y no se logra el compromiso por incorporarlo en los procedimientos y en la cultura.

**b. Diferencia de objetivos e indicadores**

El gran dilema del *Mine to Mill* es que alguien va a ceder para que la empresa gane como un todo. En el incremento de la cantidad de explosivos significa un incremento en los presupuestos de producción de la mina. Lógicamente, los costos unitarios por tonelada minada son un indicador a sustentar, por lo cual, visto desde el punto de vista de la mina, subir el factor de potencia solo significa un incremento de costos del cual no se verá beneficiado.

**c. Deficiencias de comunicación y trabajo colaborativo**

Otra de las causas de fracaso de un *Mine to Mill* es la deficiente comunicación y la falta de trabajo en equipo del personal de mina y planta. Muchas veces en organizaciones donde se han llegado a formar grupos de poder es difícil la implementación dado que las decisiones se toman de manera política y en interés de grupos particulares. Si bien la comunicación puede mejorarse estableciéndose mecanismos organizacionales, el trabajo en equipo está ligado a difundir una cultura de integración y colaboración en las empresas.

**d. Resistencia al cambio**

No hay nada más humano que el temor al cambio. El *Mine to Mill* no es ajeno a aquello. Uno de los mayores retos es romper el escepticismo y los paradigmas asociados a la implementación de la estrategia. Tanto en mina como en planta se

tienen bastantes prejuicios cuando se viene un cambio como el que representa el *Mine to Mill*.

**e. Dependencia de una persona**

En muchas organizaciones *Mine to Mill* es impulsado por una persona, la cual al salir de la organización origina que el proyecto pierda fuerza. Se debe trabajar en formar equipos multidisciplinarios que puedan amortiguar la salida del impulsor del proyecto.

**9.3.Otros hallazgos**

**a. Limitaciones del *Mine to Mill***

El *Mine to Mill*, de acuerdo a la opinión de los encuestados sólo sería eficiente en minerales de alta dureza. En minerales de baja dureza, no se vería beneficios significativos. Adicionalmente no debe aplicarse en la cercanía del cierre de la mina.

**b. Uso de Pre-chancado**

El uso de pre-chancado es una opción válida pero que implica mayor capex. Su beneficio se aprecia mejor cuando se tiene un problema mayor de diseño que limita la capacidad. Su aplicación sería en una etapa posterior al *Mine to Mill*.

## Capítulo 10

### Conclusiones y Recomendaciones

El tema de *Mine to Mill* es muy amplio y con muchas aristas. Dado que involucra muchos actores, nunca habrá un 100% de consenso en muchos puntos. De acuerdo al presente trabajo de investigación, la integración es beneficiosa económicamente y ese beneficio debe motivar a las organizaciones en su implementación. Sin embargo, se tiene que tomar en cuenta diversos factores técnicos y organizacionales.

Después de realizar este estudio se concluye:

1. De acuerdo a lo estudiado, se tiene el mayor consumo de energía en la etapa de molienda, por lo cual esta es la etapa donde se debe centrar la optimización.
2. La estrategia de integración mina y planta consiste en la optimización de la voladura para lograr beneficios en Planta. De acuerdo a la información de los documentos recopilados, es beneficiosa en términos de tonelaje procesado. De acuerdo que tan cerca o lejos este la planta de la mina, en el óptimo puede ser mayor o menor el beneficio. Los estudios analizados reportan hasta 15% de beneficio en incremento de tonelaje y mayormente su efecto se observa en la molienda *SAG*.
3. Respecto a los consumos de energía, la aplicación de *Mine to Mill* reporta en los documentos revisados una reducción del consumo de energía de hasta 18%.

Normalmente este ahorro se da en el ratio de consumo kWh/t y no en el consumo de energía global que está afectado por el mayor tonelaje procesado.

4. La principal limitación a la aplicación de mayores factores de potencia sigue siendo el aspecto geotécnico especialmente en minas donde se tiene factores de inestabilidad geotécnica como una alta proporción de aguas subterránea. Deben realizarse buenos estudios geotécnicos para no terminar usando factores de potencia demasiado conservadores.
5. Las principales variables técnicas que influyen en el fracaso del *Mine to Mill* son la geotecnia y la variabilidad del mineral.
6. La variabilidad del mineral y el hecho que los *Mine to Mill* muchas veces no predice con precisión el efecto en el tiempo de los diferentes factores de potencia hacen que muchas veces la estrategia fracase en el tiempo. Se debe invertir recursos en su actualización a medida que avanza la vida de la mina.
7. Los datos de los estudios nos muestran que existe una directa correlación entre el porcentaje de incremento de factor de potencia y el incremento del tonelaje logrado a pesar de ser unidades diferentes.
8. Los beneficios económicos en los dos casos estudiados superan ampliamente el costo del estudio (de 200 a 400 KUS\$), descontando los sobrecostos de explosivos de mina.
9. Para que el *Mine to Mill* funcione, se requiere tener en cuenta tanto aspectos técnicos como organizacionales. Lo que muchas veces no funciona son las organizaciones.
10. Las principales causas de tipo organizacional son, la falta de compromiso de la gerencia general con el programa, inercia al cambio, indicadores de desempeño

independientes, estructura organizacional que no favorece el cambio todo ello genera que la filosofía del *Mine to Mill* no se convierta en parte de la cultura de la organización.

- 11.** La tasa de éxito de los *Mine to Mill* de acuerdo a la encuesta realizada es menor al 20%. Sorprendentemente una estrategia tan simple en idea es tan difícil de sostener. La principal causa de fracaso del *Mine to Mill* es la falta de apoyo y compromiso de la gerencia general que no permite que la estrategia llegue a todos los niveles de la organización, por lo tanto, el *Mine to Mill* sólo depende de una persona que lo impulsa, la cual al salir de la organización hace que este proyecto fracase.
- 12.** De acuerdo a los encuestados el principal reto del *Mine to Mill* y la única forma que este tenga mayores tasas de éxito a largo plazo es la interiorización del valor de la integración y el trabajo colaborativo y coordinado en todos los niveles de la organización. Solo las organizaciones que han logrado interiorizar esa filosofía, que no es otra cosa que promover un cambio de cultura organizacional, han logrado que su estrategia les genere valor de manera sostenible.
- 13.** El *Mine to Mill* tiene muy buenos resultados en tecnología SAG. En otras tecnologías de conminución el beneficio es menor.
- 14.** Es un factor muy importante el conocimiento de su propia operación por parte del cliente. Muchas veces el *Mine to Mill* fracasa por desconocimiento de la empresa de su propia operación.

Además, se recomienda:

1. Debe considerarse la implementación de indicadores de producción integrados que involucren reducción de tamaño, voladura y conminución. Esto sería un primer paso hacia la integración. La existencia de indicadores separados no favorece la integración puesto que por intereses particulares se tiende a cumplir con el indicador propio sin pensar en el ajeno.
2. El *Mine to Mill* es aplicable a las minas subterráneas en el Perú, de las cuales se tiene un gran mercado. Obviamente con limitaciones geotécnicas, pero el *Mine to Mill* al ser una filosofía de integración tiene muchas formas de aplicación. De igual manera su aplicación también se da en plantas pequeñas.
3. Se recomienda la creación de un “Departamento de Integración”, con rango apropiado, cuya única función sea gestionar los beneficios logrados por medio de la integración de las áreas. Desde este punto de vista sería un gran avance. En la actualidad algunos Departamentos de Geometalurgia están tomando esta función.
4. Actualmente en la mayoría de empresas mineras se tienen los indicadores por gerencia de forma separada. Por ejemplo, ratio de kg explosivo/t minada y por otro lado kWh/t molida, dando lugar a que cada gerencia pugne por cumplirlos, a veces en perjuicio de la otra. Por ejemplo, porque no crear un indicador de costo de reducción de tamaño que involucre el explosivo usado más el gasto energético de conminución. Si se tuviera un indicador de este tipo se vería claramente como descende a medida que se implementa *Mine to Mill*.
5. El valor de la integración (cultura) deben extenderse. Existen actualmente en desarrollo programas de *Mine to Tail* y *Mine to Port* que trabajan en base a

integraciones más amplias. Estos son temas que conviene extender en la investigación y que serán parte del futuro cercano.

6. *Mine to Mill* debe ser evaluado previo a otras opciones como pre-chancado que involucran gastos de *Capex*.
7. Otros beneficios ocultos, como la mejora en el acarreo, necesitan ser cuantificados a favor de *Mine to Mill*.
8. Es recomendable la formación de equipos multidisciplinarios para el mejor desempeño del *Mine to Mill*, así como Departamentos, comités o al menos funciones de cargos específicos cuya función sea integrar. Al comienzo podrían parecer un mayor gasto de personal, pero a la larga los beneficios son enormes. Estos deben ser independientes a mina y planta. En muchas minas se usan contratistas de voladura. Los contratos deben contener términos de *Mine to Mill*.

### Referencias Bibliográficas

- Alarcon, J., Fonseca, R., Gontijo, G., & Jeric, S., (2016). Mine to Plant Commissioning in Salobo Mine. 12th International Mineral Processing Conference, Procemin 2016, (1), pp. 122-132. Santiago, Chile.
- Botero, J., Gomero, H. (2016). El Meta-Análisis: una Metodología de Nuestro Tiempo. Recuperado 30 de julio de 2018, de [http://www.infocop.es/view\\_article.asp?id=843](http://www.infocop.es/view_article.asp?id=843).
- Bye, A. R. (2006). The strategic and tactical value of a 3D geotechnical model for mining optimisation, Anglo Platinum, Sandsloot open pit. Journal South African Institute of Mining and Metallurgy, 3(1), pp. 1-8.
- Cruces, J. (2015). Fragmentación Online y su Influencia en la Optimización de la Voladura. Perumin 32° Convención Minera 2015, Arequipa, Perú.
- Dance, A., Mwansa, S., Valery, W., Amonoo, G., & Bisiaux, B. (2011). Improvement in SAG Mill Throughput from Finer Feed Size at the Newmont Ahafo Operation. International Conference on Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology, SAG 2011, Vancouver, Canada.
- Dance, A., Jankovic, A., Valery, W., & La Rosa, D. (2016). Maintaining the benefit – How to ensure Mine to Mill continues to work for you. Ninth AusIMM International Open Pit Operators Conference, Kalgoorlie, Australia.
- Diaz, R., Mamani, H., Valery, W., Jankovic, A., Valle, R., & Duffy, K. (2015). Diagnosis of process health, its treatment and improvement to maximise plant throughput at Goldfields Cerro Corona. International Conference on Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology, SAG 2015, Vancouver, Canada.
- Erwin, E. J., Brotherson, M. J., & Summers, J. A. (2011). Understanding Qualitative Metasynthesis: Issues and Opportunities in Early Childhood Intervention Research, Issues and Opportunities in Early Childhood Intervention Research. Journal of Early Intervention, 33(3), 186-200. <https://doi.org/10.1177/1053815111425493>.
- Gallestey, E., Westerlund, P., Lima, E., Rietschel, F., Andai, R., & Colbert, C., (2015). Next Level mining. Securing the future through integrated operations & information technologies. ABB Write Paper, pp 11-12. Daettwil, Switzerland.
- Gaunt, J., Symonds, D., McNamara, G., Adiyansyah, B., Kennelly, L., Sellers, E. J., & Kanchibotla, S. S., (2015). Optimisation of drill and blast for mill throughput

- improvement at Ban Houayxai Mine. Proceedings 11th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, pp. 307-314. Sydney, Australia.
- Hakami, A., Mansouri, H., Ebrahimi Farsangui, M. A., Dehghan, M.R., & Faramarzi, F., (2015). Study of the Effect of Blast Pattern Design on Autogenous and Semi-autogenous Mill Throughput at Gol-e-Gohar Iron Ore Mine. Proceedings 11th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, pp. 315-320. Sydney, Australia.
- Hart, S., Clements, B., Valery, W., Reed, M., Song, M., & Dunne, R., (2001). Optimisation of the Cadia Hill SAG Mill circuit. International Conference on Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology, SAG 2001, Vancouver, Canada.
- JKMRC (2002). Optimisation of fragmentation for downstream processing. Final report to the Australian Mineral Industries Research Association, Project P483A. JKMRC: Brisbane.
- Kanchibotla, S. S., Vizcarra, T. G., Musunuri, S. A. R., Tello, S., Hayes, A., & Moylan, T. (2015). Mine to Mill Optimisation at Paddington Gold Operations. International Conference on Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology, SAG 2015, Vancouver, Canada.
- Komljenovic, D., Loisel, G., & Kumral, M. (2017). Organization: A new focus on mine safety improvement in a complex operational and business environment. *International Journal of Mining Science and Technology*, 27(4), 617-625. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.05.006>.
- Lam, M., Jankovic, A., Valery, W., & Kanchibotla, S., (2001). Maximising SAG mill throughput at Porgera Gold Mine by optimising blast fragmentation. International Conference on Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology, SAG 2001, Vancouver, Canada.
- McKee, D. J. (2013). Understanding Mine to Mill. Recuperado de <https://www.crcore.org.au/index.php/case-studies-03/139-mine-to-mill-publication>
- Murr, D., Workman, L., Eloranta, J., & Katsabanis, P. (2015). Blasting Influence on Comminution. International Conference on Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology, SAG 2015, Vancouver, Canada.
- Paley, N. (2010). Testing electronic detonators to increase SAG mill throughput at the Red Dog Mine. Proceedings, 36<sup>th</sup> Annual Conference on Explosives and Blasting

- Terchniques, Orlando, (1), pp. 65-80. International Society of Explosives Engineers: Cleveland.
- Rybinski, E., Ghersi, J., Davila, F., Linares, J., Valery, W., Jankovic, A., Valle, R., & Dikmen, S. (2011). Optimisation and Continuous Improvement of Antamina Comminution Circuit. International Conference on Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology, SAG 2011, Vancouver, Canada.
- Rojas, M. (2009). Descripción cuantitativa de los Procesos de Extracción-Reducción de mineral en la minería de cobre a Cielo Abierto. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Scott, A., Kanchibotla, S., & Morrel, S., (1999). Blasting for mine to mill optimisation. Explo '99, pp. 3-8. Kalgoorlie, WA.
- SNMPE (2018). Reporte Estadístico Minero Energético 2017. Recuperado de <https://www.snmpe.org.pe/informes-y-publicaciones/reporte-estadistico-mineroenergetico/5113-ano-2017-abril-2018.html>
- Titicocha, G., Magne, L., Pereira, G., Andrades, G., & Molinet, P. (2008). Evaluación del concepto mina-planta en la planta de molienda semiautógena de División Andina de Codelco Chile. Revista Remetallica. (16), pp. 32-38. Santiago, Chile.
- Valery, W., Alvarez, L., Colacioppo, J., & Muñoz, A., (2008). Process Integration and Optimisation at Freeport – McMoran Candelaria Mine. 5th International Mineral Processing Conference, Procemin 2008, Chapter 6, pp. 303-315. Santiago, Chile.
- Workman, L., & Eloranta, J., (2003). The Effects of Blasting on Crushing and Grinding Efficiency and Energy Consumption. Proc ISEE 29th Ann Conf Expl & Blasting Technic, I, pp. 131-140.

## Apéndice 1. Encuesta de Mine to Mill – Proveedores



### ENCUESTA DE MINE TO MILL - PROVEEDORES

Esta es una encuesta exploratoria de opiniones sobre experiencias Mine to Mill con fines netamente académicos.

Por favor conteste de acuerdo a su percepción personal.

No es necesario brindar información confidencial. La información brindada será utilizada como parte de trabajos de tesis de la institución.

Si desea permanecer anónimo por favor indicar

Anónimo:

Nombre:

Cargo que desempeña:

Empresa:

1. La empresa que forma parte, ¿a partir de que año empezó a dar soporte de Mine to Mill a nivel comercial?

2. Normalmente, ¿que área hace la solicitud de implementación de Mine to Mill?

Gerencia  Mina  Planta  Otra

3. ¿Cuál es el mayor mercado mundial de los estudios de Mine to Mill? Dentro de este, ¿algún nicho en especial?, tal vez por metal: Hierro, Cobre, Platino, entre otros.

Área:

África  Oceanía  Asia  Europa  América

Comentario

Metal:

Polimetálicos  Cu  Fe  Au  Otros: \_\_\_\_\_

Comentario

4. ¿En qué rango de valor puede ser cotizado el desarrollo de Mine to Mill?

Menos de 100K, \$  De 100 a <200K, \$  De 200 a <300K, \$  Más de 300K, \$

5. ¿Cuánto demora normalmente la implementación del Mine to Mill?

Menos de 3 meses  De 3 a < 6 meses  De 6 meses a <1 año  Más de 1 año

6. ¿Cuál es el entregable que el cliente espera del proveedor?

7. ¿En su experiencia, cuáles son los mayores beneficios cuantificables (tonelaje, energía, recuperación) producidos cuando se implementa de manera exitosa un Mine to Mill? Indique qué porcentaje de mejora se produjo.

Incremento en el tonelaje:

0 a <10%  10 a <20%  20 a <30%  Mayor a 30%

Reducción de la energía:

0 a <10%  10 a <20%  20 a <30%  Mayor a 30%

Incremento en la recuperación:

- 0 a <10%     
  10 a <20%     
  20 a <30%     
  Mayor a 30%

Comentario

8. Después de la implementación del Mine to Mill, de acuerdo a su experiencia, ¿qué porcentaje de clientes tienen éxito en el sostenimiento del Mine to Mill en el largo plazo?

- Menos del 20%     
  De 20 a 50%     
  De 50 a 75%     
  De 75 a 100%

Comentario

9. ¿En qué medida las siguientes variables organizacionales influyen en el éxito o fracaso en la implementación de la estrategia del Mine to Mill? Marque los necesarios.

|   | Muy bajo<br>1            | Bajo<br>2                | Medio<br>3               | Alto<br>4                | Muy alto<br>5            |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Liderazgo Gerencia General<br><i>(El bajo compromiso de la GG puede hacer fracasar la implementación o sostenimiento del Mine to Mill).</i>   | <input type="checkbox"/> |
| Trabajo en equipo Mina - Planta<br><i>(El hecho que dos Gerencias con intereses políticos y de gestión frecuentemente distintos participen en el Mine to Mill podría ser perjudicial en la implementación o sostenimiento).</i> | <input type="checkbox"/> |
| Desalineamiento de los KPI entre Gerencias<br><i>(El viejo dilema del cumplimiento del KPI de explosivos contra el KPI de tonelaje).</i>  | <input type="checkbox"/> |
| Resistencia al cambio<br><i>(Se refiere a la inercia de la organización por mantener sus antiguas prácticas operativas).</i>  | <input type="checkbox"/> |
| Dificultad para medir los beneficios<br><i>(A veces es complicado cuantificar los beneficios del mine to mill).</i>   | <input type="checkbox"/> |
| Cultura organizacional<br><i>(Organización vertical u horizontal).</i>  | <input type="checkbox"/> |
| No contar con un departamento de integración Mina - Planta<br><i>(Departamento independiente de las gerencias mina-planta cuya función sea atender los aspectos de la integración de procesos).</i>                             | <input type="checkbox"/> |
| Otros: _____  | <input type="checkbox"/> |

Comentario

10. ¿En qué medida los siguientes variables organizacionales influyen en el éxito o fracaso en el sostenimiento de la estrategia del Mine to Mill? Marque los necesarios.

|   | Muy bajo<br>1            | Bajo<br>2                | Medio<br>3               | Alto<br>4                | Muy alto<br>5            |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Liderazgo Gerencia General<br><i>(El bajo compromiso de la GG puede hacer fracasar la implementación o sostenimiento del Mine to Mill).</i>   | <input type="checkbox"/> |
| Trabajo en equipo Mina - Planta<br><i>(El hecho que dos Gerencias con intereses políticos y de gestión frecuentemente distintos participen en el Mine to Mill podría ser perjudicial en la implementación o sostenimiento).</i> | <input type="checkbox"/> |
| Desalineamiento de los KPI entre Gerencias<br><i>(El viejo dilema del cumplimiento del KPI de explosivos contra el KPI de tonelaje).</i>  | <input type="checkbox"/> |
| Resistencia al cambio<br><i>(Se refiere a la inercia de la organización por mantener sus antiguas prácticas operativas).</i>  | <input type="checkbox"/> |
| Dificultad para medir los beneficios<br><i>(A veces es complicado cuantificar los beneficios del mine to mill).</i>   | <input type="checkbox"/> |
| Cultura organizacional<br><i>(Organización vertical u horizontal).</i>  | <input type="checkbox"/> |
| No contar con un departamento de integración Mina - Planta<br><i>(Departamento independiente de las gerencias Mina-Planta cuya función sea atender los aspectos de la integración de procesos).</i>                             | <input type="checkbox"/> |
| Otros: _____  | <input type="checkbox"/> |

11. ¿En qué medida los riesgos asociados a la voladura (deslizamientos de tierra, inestabilidad geotécnica, etc.) influyeron en la implementación y la sostenibilidad de Mine to Mill?

|                                       | Muy bajo<br>1            | Bajo<br>2                | Medio<br>3               | Alto<br>4                | Muy alto<br>5            |
|---------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| En la implementación del Mine to Mill | <input type="checkbox"/> |
| En la sostenibilidad del Mine to Mill | <input type="checkbox"/> |

Comentario

12. El hecho que dos o más gerencias participen en la implementación, ¿hace más difícil la sostenibilidad del proyecto? Explique ¿por qué?

|   | Muy bajo<br>1            | Bajo<br>2                | Medio<br>3               | Alto<br>4                | Muy alto<br>5            |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Aspectos Organizacionales<br><i>(Problemas de coordinación, acuerdos, incentivos individuales, KPI no se comparten, cultura organizacional diferente entre mina y planta, etc).</i> | <input type="checkbox"/> |
| Aspectos Operacionales<br><i>(Problemas operacionales, resistencia al cambio, puesta en práctica, etc).</i>   | <input type="checkbox"/> |
| Aspectos Económicos<br><i>(Presupuestos compartidos, asignación de costos y beneficios equitativos, etc).</i>   | <input type="checkbox"/> |
| Técnicos<br><i>(Factibilidad técnica, discrepancias técnicas, etc).</i>   | <input type="checkbox"/> |

Comentario

13. De lo expuesto en la pregunta 12, ¿qué solución se le puede dar? ¿qué experiencias positivas respecto a este punto ha podido observar?

14. Para los casos donde se haya tenido éxito en la sostenibilidad del Mine to Mill, ¿qué factor explica el resultado?

15. Para los casos donde se haya fracasado en la sostenibilidad del Mine to Mill, ¿qué factor explica el resultado?

16. ¿Qué empresa puede ser considerada ejemplo de éxito en la implementación del Mine to Mill? Explique.

17. ¿Se tiene diferencias en la implementación del Mine to Mill a través del mundo? ¿Hay mayor tasa de éxito en alguna zona en particular? Por ejemplo Australia, Canadá u otros. Si usted opina que hay diferencias, explique ¿por qué?

18. ¿La tecnología de conminución influye en los resultados? Es decir, ¿los beneficios esperados cambiarían si son plantas que usan molienda convencional, SAG o HPGR? Por favor comente.

19. ¿El tipo de yacimiento influye en los resultados? Es decir, ¿los beneficios esperados cambiarían para yacimientos tipo pórfido, skarn, VMS, IOGC, entre otros? Por favor comente.

20. ¿El tipo de mineral influye en los resultados? Es decir, ¿los beneficios esperados cambiarían si explota Hierro, Oro ó Cobre? Por favor comente.

21. ¿Se puede implementar el Mine to Mill en minas subterráneas? Si la respuesta es negativa, por favor explique ¿por

22. Si la respuesta es sí, ¿Cuál es el objetivo del Mine to Mill en las minas subterráneas? ¿Incremento en el tonelaje, ¿Reducción de energía?, etc. Por favor comente.

23. ¿Conviene la implementación del estudio para plantas pequeñas (menores a 5000 thp)? Si la respuesta es negativa,

24. ¿Cuál es el impacto de la dureza del mineral en los siguientes procesos en la implementación del Mine to Mill ?

|                     | Muy bajo<br>1            | Bajo<br>2                | Medio<br>3               | Alto<br>4                | Muy alto<br>5            |
|---------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Perforación         | <input type="checkbox"/> |
| Voladura            | <input type="checkbox"/> |
| Carguío             | <input type="checkbox"/> |
| Acarreo             | <input type="checkbox"/> |
| Capacidad de planta | <input type="checkbox"/> |

Comentario

25. ¿Cuál es el impacto de la mayor fragmentación en Mine to Mill?

|                    | Muy bajo<br>1            | Bajo<br>2                | Medio<br>3               | Alto<br>4                | Muy alto<br>5            |
|--------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Carguío            | <input type="checkbox"/> |
| Acarreo            | <input type="checkbox"/> |
| Desgaste de equipo | <input type="checkbox"/> |
| Planta             | <input type="checkbox"/> |

Comentario

26. ¿Cuál es el nivel de restricción para el uso de mayores cantidades de explosivos en la fragmentación?

|                   | Muy bajo<br>1            | Bajo<br>2                | Medio<br>3               | Alto<br>4                | Muy alto<br>5            |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Geotécnia         | <input type="checkbox"/> |
| Acarreo           | <input type="checkbox"/> |
| Costo de voladura | <input type="checkbox"/> |

Comentario

27. En algunos casos de implementación del Mine to Mill, ¿han sido necesarias inversiones mayores? Por ejemplo: tipo perforadoras, camiones de mina, etc.

Sí

No

Detallar

28. En su opinión, ¿cree ud. que el Perú sea un buen mercado para la implementación de estrategias Mine to Mill?  
¿Por qué?

29. ¿Alguna vez el ahorro de energía que se ha logrado en algunas operaciones ha sido cuantificado en términos de huella de carbono? Esto por un tema ambiental.

30. ¿Existen otras alternativas al Mine to Mill, por ejemplo pre-chancado? Por favor comente.

31. Cuando se realiza la evaluación del Mine to Mill ¿se cuantifican otros beneficios ocultos? Tales como mejora en el acarreo, carguío, etc.

32. Basado en su experiencia ¿cree usted que el Mine to Mill puede ser aplicado a todas las minas? ¿Si o No? ¿Por qué?

33. ¿Tiene algún comentario adicional que considere importante ser incluido en este estudio?

## Apéndice 2. Encuesta de Mine to Mill – Operadores



### ENCUESTA DE MINE TO MILL - OPERADORES

Esta es una encuesta exploratoria de opiniones sobre experiencias Mine to Mill con fines netamente académicos.

Por favor conteste de acuerdo a su percepción personal.

No es necesario brindar información confidencial. La información brindada será utilizada como parte de trabajos de tesis de la institución.

Si desea permanecer anónimo por favor indicar

Anónimo:

Nombre:

Cargo que desempeña:

Empresa:

1. ¿En qué año su empresa inició la implementación del Mine to Mill?

2. ¿Cuál fue la razón para la implementación del Mine to Mill?

3. ¿Qué área de la empresa sugirió la implementación?

Mina

Planta

Gerencia

Otros

4. ¿Qué proveedor les suministró el Mine to Mill?

5. ¿Cuánto duró la implementación del Mine to Mill? Desde el inicio hasta el reporte final.

Menos de 3 meses

De 3 a <6 meses

De 6 meses a 1 año

Más de 1 año

6. ¿Qué beneficios se obtuvieron con la implementación del Mine to Mill? Marque solo los beneficios obtenidos y estime un porcentaje de mejora:

Incremento en el tonelaje:

0 a <10%

10 a <20%

20 a <30%

Igual o Mayor a 30%

Reducción de la energía:

0 a <10%

10 a <20%

20 a <30%

Igual o Mayor a 30%

Incremento en la recuperación:

0 a <10%

10 a <20%

20 a <30%

Igual o Mayor a 30%

Comentario

7. ¿En qué medida las siguientes variables organizacionales influyen en el éxito o fracaso en la implementación de la estrategia del Mine to Mill? Marque los necesarios.

Muy bajo

Bajo

Medio

Alto

Muy alto

Liderazgo Gerencia General






(El bajo compromiso de la Gerencia General puede hacer fracasar la implementación o sostenimiento del Mine to Mill).

|   |                          |                          |                          |                          |                          |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Trabajo en equipo Mina - Planta<br><i>(El hecho que dos Gerencias con intereses políticos y de gestión frecuentemente distintos participen en el Mine to Mill podría ser perjudicial en la implementación o sostenimiento).</i> | <input type="checkbox"/> |
| Desalineamiento de los KPI entre Gerencias<br><i>(El viejo dilema del cumplimiento del KPI de explosivos contra el KPI de tonelaje).</i>  | <input type="checkbox"/> |
| Resistencia al cambio<br><i>(Se refiere a la inercia de la organización por mantener sus antiguas prácticas operativas).</i>  | <input type="checkbox"/> |
| Dificultad para medir los beneficios<br><i>(A veces es complicado cuantificar los beneficios del Mine to Mill).</i>   | <input type="checkbox"/> |
| Cultura organizacional<br><i>(Organización vertical u horizontal).</i>  | <input type="checkbox"/> |
| No contar con un departamento de integración Mina-Planta<br><i>(Departamento independiente de las gerencias Mina-Planta cuya función sea atender los aspectos de la integración de procesos).</i>                               | <input type="checkbox"/> |
| Otros: _____  | <input type="checkbox"/> |

Comentario

8. En su empresa, ¿se ha seguido aplicando el Mine to Mill después de la implementación a la fecha? Sí \_\_\_\_

9. ¿En qué medida las siguientes variables organizacionales influyen en el éxito o fracaso en el sostenimiento de la estrategia del Mine to Mill? Marque los necesarios.

|   | Muy bajo<br>1            | Bajo<br>2                | Medio<br>3               | Alto<br>4                | Muy alto<br>5            |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Liderazgo Gerencia General<br><i>(El bajo compromiso de la GG puede hacer fracasar la implementación o sostenimiento del Mine to Mill).</i>   | <input type="checkbox"/> |
| Trabajo en equipo Mina - Planta<br><i>(El hecho que dos Gerencias con intereses políticos y de gestión frecuentemente distintos participen en el Mine to Mill podría ser perjudicial en la implementación o sostenimiento).</i> | <input type="checkbox"/> |
| Desalineamiento de los KPI entre Gerencias<br><i>(El viejo dilema del cumplimiento del KPI de explosivos contra el KPI de tonelaje).</i>  | <input type="checkbox"/> |
| Resistencia al cambio<br><i>(Se refiere a la inercia de la organización por mantener sus antiguas prácticas operativas).</i>  | <input type="checkbox"/> |
| Dificultad para medir los beneficios<br><i>(A veces es complicado cuantificar los beneficios del mine to mill).</i>   | <input type="checkbox"/> |
| Cultura organizacional<br><i>(Organización vertical u horizontal).</i>  | <input type="checkbox"/> |
| No contar con un departamento de integración Mina-Planta  | <input type="checkbox"/> |
| Otros: _____  | <input type="checkbox"/> |

Comentario

10. ¿En qué medida los riesgos asociados a la voladura (deslizamientos de tierra, inestabilidad geotécnica, etc.) influyeron en la implementación y la sostenibilidad de Mine to Mill?

|                                       | Very low<br>1            | Low<br>2                 | Medium<br>3              | High<br>4                | Very high<br>5           |
|---------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| En la implementación del Mine to Mill | <input type="checkbox"/> |
| En la sostenibilidad del Mine to Mill | <input type="checkbox"/> |

Comentario

11. ¿Cuál es el impacto de la dureza del mineral en los siguientes procesos en la implementación del Mine to Mill?

|                     | Muy bajo<br>1            | Bajo<br>2                | Medio<br>3               | Alto<br>4                | Muy alto<br>5            |
|---------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Perforación         | <input type="checkbox"/> |
| Voladura            | <input type="checkbox"/> |
| Carguío             | <input type="checkbox"/> |
| Acarreo             | <input type="checkbox"/> |
| Capacidad de planta | <input type="checkbox"/> |

Comentario

12. ¿Cuál es el impacto de la mayor fragmentación en los siguientes procesos en la implementación del Mine to Mill?

|                    | Muy bajo<br>1            | Bajo<br>2                | Medio<br>3               | Alto<br>4                | Muy alto<br>5            |
|--------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Carguío            | <input type="checkbox"/> |
| Acarreo            | <input type="checkbox"/> |
| Desgaste de equipo | <input type="checkbox"/> |
| Planta             | <input type="checkbox"/> |

Comentario

13. ¿En qué grado limita cada una de las siguientes variables en el incremento de la cantidad de explosivos en la fragmentación?

|                   | Muy bajo<br>1            | Bajo<br>2                | Medio<br>3               | Alto<br>4                | Muy alto<br>5            |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Geotécnia         | <input type="checkbox"/> |
| Acarreo           | <input type="checkbox"/> |
| Costo de voladura | <input type="checkbox"/> |

Comentario

14. El hecho de que dos Gerencias diferentes participen en esta implementación del Mine to Mill, ¿presentó alguna dificultad en la sostenibilidad del proyecto? ¿En qué grado?

|   | Muy bajo<br>1            | Bajo<br>2                | Medio<br>3               | Alto<br>4                | Muy alto<br>5            |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Aspectos Organizacionales<br><i>(Problemas de coordinación, acuerdos, incentivos individuales, KPI no se comparten, cultura organizacional diferente entre mina y planta, etc).</i> | <input type="checkbox"/> |
| Aspectos Operacionales<br><i>(Problemas operacionales, resistencia al cambio, puesta en práctica, etc).</i>   | <input type="checkbox"/> |
| Aspectos Económicos<br><i>(Presupuestos compartidos, asignación de costos y beneficios equitativos, etc).</i>   | <input type="checkbox"/> |
| Técnicos<br><i>(Factibilidad técnica, discrepancias técnicas, etc).</i>   | <input type="checkbox"/> |

Comentario

15. ¿Cuál de estas técnicas son las que más impactan en los resultados de Mine to Mill? ¿En qué grado?

|                                  | Muy bajo<br>1            | Bajo<br>2                | Medio<br>3               | Alto<br>4                | Muy alto<br>5            |
|----------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Tipo de yacimiento               | <input type="checkbox"/> |
| Grado de fragmentación requerido | <input type="checkbox"/> |

|                           |                          |                          |                          |                          |                          |
|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Dureza del mineral        | <input type="checkbox"/> |
| Tecnología de conminución | <input type="checkbox"/> |
| Otros: _____              | <input type="checkbox"/> |

Comentario

16. ¿Por favor indique qué metal se explota en su operación y qué método de explotación se usa?

|              | Tajo Abierto             | Subterráneo              | Mixto                    |
|--------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Cobre        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Oro          | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Hierro       | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Polimetálico | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Otros: _____ | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

17. ¿Cuánto costó la implementación del Mine to Mill y en cuánto tiempo se recuperó la inversión?

18. ¿Recomendaría usted la implementación del Mine to Mill a las empresas mineras?

19. ¿Se evaluaron otras alternativas al Mine to Mill, por ejemplo pre-chancado? Por favor comente.

20. ¿Se cuantificaron otros beneficios ocultos? Tales como mejora en el acarreo, carguío, etc.

21. Basado en su experiencia, ¿cree usted que el Mine to Mill puede ser aplicado a todas las minas? ¿Si o No? ¿Por qué?

22. ¿Tiene alguna otra idea que considere importante de incluir en este estudio?

### Apéndice 3. Paddington Gold Operations



#### **MINE TO MILL OPTIMISATION AT PADDINGTON GOLD OPERATIONS**

\*S.S. Kanchibotla<sup>1</sup>, T.G. Vizcarra<sup>1</sup>, S.A.R. Musunuri<sup>1</sup>, S. Tello<sup>1</sup>, A. Hayes<sup>2</sup> and T. Moylan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*JKTech Pty Ltd  
40 Isles Road  
Inchooropilly, QLD Australia 4068  
(Corresponding author: s.kanchibotla@jkttech.com.au)*

<sup>2</sup>*Norton Gold Fields Limited  
Level 36, Exchange Plaza 2, The Esplanade  
Perth, WA 6000*

## Apéndice 4. División Andina de Codelco

### EVALUACIÓN DEL CONCEPTO MINA-PLANTA, EN LA PLANTA DE MOLIENDA SEMIAUTÓGENA DE DIVISIÓN ANDINA DE CODELCO CHILE

Gilda Titichoca<sup>1</sup>, Luis Magne<sup>1</sup>, G. Pereira<sup>2</sup>, G. Andrades<sup>2</sup>, P. Molinet<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Profesores del Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Santiago de Chile  
Universidad de Santiago de Chile, gtitichoca@usach.cl

<sup>2</sup>Codelco Chile, División Andina, pedimoli@codelco.cl

#### Resumen

El concepto Mina – Planta, desarrollado inicialmente por JKTech, en Australia, considera que cualquier aumento en el consumo de energía de las etapas dispuestas aguas arriba en el circuito, genera beneficios mayores en las etapas posteriores (asociados a una mayor disminución del consumo de energía). De esta forma, aunque se duplique el costo de tronadura, generando una mayor proporción de finos además de un mineral más débil (debido a que con cargas y distribuciones adecuadas de explosivos se genera una mayor cantidad de grietas internas), la reducción de costos unitarios que se observa en las etapas de molienda semiautógena y de bolas, genera un balance positivo en el proceso global de reducción de tamaños.

División Andina de Codelco Chile, desarrolló un extenso plan de evaluación del concepto Mina – Planta, aplicando mayor energía en la etapa de tronadura. Esta acción fue implementada en dos etapas, abarcando en cada una de ellas un sector específico de la mina: La Unión y Don Luis.

Considerando el impacto de la implementación de esta acción en los conceptos de diseño y operación de una planta de molienda semiautógena, en el presente artículo se revisa la experiencia de realizar modificaciones en la tronadura en un circuito de molienda semiautógena industrial.

#### Introducción

En el procesamiento de minerales, la reducción de tamaños se realiza en una secuencia de etapas. Esto

permite una clasificación de los equipos y métodos empleados. En primer lugar se distingue entre tronadura, chancado y molienda:

- La *tronadura* incluye actividades que se realizan directamente en la corteza terrestre e involucra la perforación de pozos, la carga con explosivos y la posterior activación para generar un adecuado grado de fragmentación de la roca en tamaños que permitan su manejo y transporte. El tamaño máximo final estará restringido por el equipo de reducción primaria que se tenga en la planta.
- El *chancado* se aplica a la reducción de tamaños del material extraído de la mina hasta partículas de aproximadamente 10 mm.
- La *molienda* corresponde a la reducción a tamaños aún más pequeños, desde 10 mm a 100 µm.

Uno de los aspectos más importantes de los procesos de reducción de tamaños se relaciona con los altos costos asociados principalmente a acero (revestimientos y medios de molienda) como a energía. Esta situación es el resultado de la necesidad de realizar el proceso de reducción de tamaños a todo el mineral extraído de la mina, cuya composición en peso, para el caso de los sulfuros de cobre, es de 2 a 5% de especies minerales de interés, siendo la diferencia ganga que una vez reducida de tamaño debe ser depositada en los tranques de relaves.

La energía consumida en el proceso de tronadura es la energía química del explosivo, que una vez iniciado se transforma a través de la detonación en productos gaseosos a altas presiones y temperaturas.

## Apéndice 5. Newmont Ahafo Operation

### IMPROVEMENTS IN SAG MILL THROUGHPUT FROM FINER FEED SIZE AT THE NEWMONT AHAFO OPERATION

\*Adrian Dance<sup>1</sup>, Sonny Mwansa<sup>2</sup>, Walter Valery<sup>2</sup>, George Amonoo<sup>3</sup> and Bryon Bisiaux<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*SRK Consulting (Canada) Inc  
22nd Floor, 1066 West Hastings Street  
Vancouver BC V6E 3X2 Canada  
(\*corresponding author: [adance@srk.com](mailto:adance@srk.com))*

<sup>2</sup>*Metso Process Technology & Innovation  
Unit 1, 8-10 Chapman Place  
Eagle Farm Qld 4009 Australia*

<sup>3</sup>*Newmont Ghana Gold Limited  
C825/26 Lagos Avenue  
Ghana E Legon, Accra, Ghana*

## Apéndice 6. Operación Cerro Corona de Gold Fields



### **DIAGNOSIS OF PROCESS HEALTH, ITS TREATMENT AND IMPROVEMENT TO MAXIMISE PLANT THROUGHPUT AT GOLDFIELDS CERRO CORONA**

Ronald Diaz<sup>1</sup>, Hyder Mamani<sup>1</sup>,  
Walter Valery<sup>2</sup>, Alex Jankovic<sup>2</sup>, Roberto Valle<sup>2</sup>, and Kristy-Ann Duffy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Gold Fields La Cima S.A.A*  
*Derby 055, torre 1, Oficina 301, Santiago de Surco*  
*Lima 33, Perú*  
*(Ronald.Diaz@goldfields.com.pe)*

<sup>2</sup>*Metsu Process Technology and Innovation*  
*Queensland Center for Advance Technology 1, Technology Court, Pullenvale, QLD, Australia*  
*(Walter.Valery@metso.com)*

## Apéndice 7. Operación Cuajone de Southern Perú

TT-069



### MONITOREO CONTINUO, MEDICIÓN DE LA FRAGMENTACIÓN ONLINE Y SU INFLUENCIA EN LA OPTIMIZACIÓN DE LA VOLADURA

1. JESUS CRUCES HERRERA  
JEFE GENERAL DE MINA  
SOUTHERN PERU COPPER  
CORPORATION CUAJONE

#### Resumen

La fragmentación de las rocas juega un papel importante en la mejora continua del proceso de perforación y voladura realizarlo en tiempo real mediante un sistema que nos permite tener más de 400 fotos y nos brinda una data más confiable.

El costo de perforación y voladura en mina es aproximadamente el 20% del costo directo, un material más fragmentado y homogéneo implica mayor cantidad de finos, menores costos en trituración, y por ende mayor tonelaje tratado en molinera primaria.

En mina Cuajone hemos implementado un sistema de reporte on-line para el seguimiento en tiempo real medición de la fragmentación, con el objetivo de tener una adecuada distribución de tamaño para maximizar el desempeño de los procesos posteriores tanto en mineral como desmonte.

La medición de la fragmentación de manera sistematizada, nos proporciona un

aproximado de 2000 fotos por día (fotos que son tomadas en cada cucharón de pala que descarga en los volquetes) y son analizadas en tiempo real, de forma continua y vía online. Esto nos proporcionará una data más confiable y una mejor evaluación de la granulometría, con la que podemos medir nuestros logros y trazar objetivos con respecto a la fragmentación.

#### 1. ANTECEDENTES

La mina Cuajone tiene varios tipos de roca que van con índices de dureza (Work Index) desde 13 hasta 22 de WI en mineral.

|   | TIPO DE ROCA                       | WI   |
|---|------------------------------------|------|
| 1 | Rilita porfirítica cuarzo sericita | 9.3  |
| 2 | Andesita basáltica argílica        | 13.5 |
| 3 | Latita porfirítica potásica        | 15.3 |
| 4 | Andesita intrusiva filica          | 17.5 |
| 5 | Andesita basáltica propílica       | 22   |

En desmonte tenemos rocas como Latitas, Tobas, traquitas que por lo general son rocas que tienen un comportamiento variable para la voladura y necesita monitoreo continuo para establecer el punto de equilibrio de tamaños de fragmentos para mantener los depósitos de desmonte con una estabilidad y un ángulo de reposo recomendado.

#### 1.1 Medición de la Fragmentación convencional.

En mina Cuajone se tiene una empresa especializada en el servicio de voladura quienes eran los encargados de realizar el monitoreo de la fragmentación de todas las palas.

El seguimiento de la fragmentación era realizado mediante el uso de un Software que consiste en la toma de fotografías en campo, se obtiene una a tres fotos por día en cada frente de pala.

## Apéndice 8. Compañía Minera Antamina

### OPTIMISATION AND CONTINUOUS IMPROVEMENT OF ANTAMINA COMMINATION CIRCUIT

Edward Rybinski<sup>1</sup>, Jorge Ghersi<sup>1</sup>, Frank Davila<sup>1</sup>, Javier Linares<sup>1</sup>  
Walter Valery<sup>2</sup>, Alex Jankovic<sup>2</sup>, Roberto Valle<sup>2</sup> and Serkan Dikmen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Compañía Minera Antamina S.A*

*Derby 055, torre 1, piso 8, oficina 801, Santiago de Surco*

*Lima 33, Perú*

*([erybinski@antamina.com](mailto:erybinski@antamina.com), [jghersi@antamina.com](mailto:jghersi@antamina.com), [jalinares@antamina.com](mailto:jalinares@antamina.com), [fdavila@antamina.com](mailto:fdavila@antamina.com))*

<sup>2</sup>*Metso Process Technology and Innovation*

*1/8-10 Chapman Place*

*Eagle Farm, Brisbane, QLD, Australia*

*([walter.valery@metso.com](mailto:walter.valery@metso.com))*

## Apéndice 9. Ban Houayxai Mine

# Optimisation of Drill and Blast for Mill Throughput Improvement at Ban Houayxai Mine

J Gaunt<sup>1</sup>, D Symonds<sup>2</sup>, G McNamara<sup>3</sup>, B Adiyansyah<sup>4</sup>, L Kennelly<sup>5</sup>, E J Sellers<sup>6</sup> and S S Kanchibotla<sup>7</sup>

### ABSTRACT

Ban Houayxai is a gold-silver mine operated by Phu Bia Mining Limited in Laos since 2012. The first two years of operation processed predominately soft oxidised ore but subsequent years were expected to process more fresh hard ore. Fragmentation of the fresh primary ores was also expected to be much coarser than for the soft oxide ores. This coarser and harder ore is expected to significantly reduce mill throughput and mining productivity. The Ban Houayxai management realised the potential downside risk when processing fresh harder ores and implemented a blast optimisation project to deliver finer fresh ore to the mill without unduly increasing blast induced dilution and damage.

JKTech and the Ban Houayxai drill and blast team began a joint blast optimisation project in April 2013 to achieve finer fragmentation from fresh ores. This was achieved by modifying the bench geometry, blast patterns and applying exceptionally high levels of quality control during implementation. Blast induced ore loss and dilution was controlled by adjusting the ore blocks for blast movement. Finer fragmentation from these modified designs improved mill throughput for the hard fresh ore by 46 per cent above design on average. These new practices have been embedded in site operating procedures and have provided a quick reference 'cookbook' document for the engineers.

### INTRODUCTION

Ban Houayxai is a gold-silver mine owned by PanAust Limited (an Australian Securities Exchange-listed company) and operated by PanAust's 90 per cent-owned subsidiary Lao-registered company, Phu Bia Mining Limited (the Government of Laos owns the remaining ten per cent) in Laos since 2012. The first two years of operation had processed predominately soft oxidised ore but subsequent years were expected to process more fresh hard ore. Fragmentation of the fresh primary hard ores was also expected to be much coarser than for the soft oxide ores. The feasibility design throughput of the mill processing hard primary ores was estimated to be around 400 t/h compared to 700 t/h for the oxide ore. Figure 1 shows a snapshot of throughput changes in the semi-autogenous grinding (SAG) mill while feeding the fresh hard ore. It can be clearly seen that mill throughput has dropped from approximately 700 t/h when processing oxide ore to almost 300 t/h when processing hard primary ore. This reduction in throughput with primary ores is more than

what was predicted in the feasibility designs and it posed a significant business risk to the operations.

In addition to the throughput reduction, the coarse fragmentation also posed significant maintenance risks to machinery, storage bins and conveyors due to high transfer drops. Since there is no stockpile between the primary crusher and the mill, any changes in the feed characteristics also lead to wide fluctuations in mill performance and do not provide enough time for the mill operators to adjust the mill operating conditions. Therefore, feeding the mill with finer and consistent ore characteristics is considered to be critical to maintain consistent mill throughput.

Drilling and blasting is the first step in the comminution and separation process and plays a major role in providing consistent and finer feed to the mill (Kanchibotla, 2000). The energy and cost of drill and blast is relatively less compared to the crushing and grinding breakage downstream (Kanchibotla, 2014), hence there is an opportunity to utilise the explosive energy to provide a finer and consistent feed

1. MUsMM, General Manager, Ban Houayxai Operations, Phu Bia Mining Ltd, Laos. Email: jonathan.gaunt@pbm.com
2. Mining Manager, Ban Houayxai Operations, Phu Bia Mining Ltd, Laos. Email: dwayne.symonds@pbm.panaust.com
3. Drill and Blast Regional Advisor, Ban Houayxai Operations, Phu Bia Mining Ltd, Laos. Email: macca@chf-geotech.nlk.nf
4. Geotechnical Engineer, Ban Houayxai Operations, Phu Bia Mining Ltd, Laos. Email: bayuprima.adiyansyah@pbm.panaust.com
5. MUsMM, Mining Specialist, JKTech Pty Ltd, 40 Isles Road, Indooroopilly Qld 4068. Email: L.kennelly@jktch.com.au
6. MUsMM(CP), Principal Mining Engineer, JKTech Pty Ltd, 40 Isles Road, Indooroopilly Qld 4068. Email: e.sellers@jktch.com.au
7. MUsMM, Senior Advisor, JKTech Pty Ltd, 40 Isles Road, Indooroopilly Qld 4068. Email: s.kanchibotla@uq.edu.au

## Apéndice 10. Porgera Gold Mine

Page 1

### MAXIMIZING SAG MILL THROUGHPUT AT PORGERA GOLD MINE BY OPTIMIZING BLAST FRAGMENTATION

Mike Lam, Senior Metallurgist, Porgera Joint Venture  
Dr. Aleksandar Jankovic, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre  
Dr. Walter Valery, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre  
Sarna Kanchibotla, DynoConsult – Dyno Nobel Asia Pacific

#### ABSTRACT

Porgera Joint Venture (PJV) and Dyno Nobel initiated a project to optimize drilling and blasting practices for downstream operations. The SAG mill was identified as a production bottle neck when treating hornblende diorite ore. Consequently, it was agreed that the project would focus on optimizing the fragmentation size distribution for the crushing and SAG milling circuits. The Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKMRC) was sub-contracted to investigate the impact of blasting on SAG mill throughput.

Rock characterization, blast and mill surveys were conducted on hornblende diorite. The data was used to build site specific models for blast fragmentation, primary crushing, and SAG and ball milling. The models were linked and simulations performed to investigate the influence of ROM fragmentation on SAG mill throughput. Based on these simulations, modifications were made to blasting practices and primary crusher settings. Two additional surveys were conducted to validate the models. This paper discusses the methodology and results achieved.

## Apéndice 11. Kalgoorlie

### CASE STUDY #1: Blasting for increased SAG Mill throughput — Example B

#### Site

KCGM (Fimiston, Australia)



#### Principal Reference

Karageorgos et al (2001)

#### Brief summary of application

The KCGM operation treats ore from the Super Pit at Kalgoorlie. This study was conducted as part of AMIRA Projects P483 and P483A. The first project involved the development of blast fragmentation and comminution circuit models, and simulation of changed blast designs. The second project involved updating the models to reflect the blasting performance in the current mining benches followed by implementation of a revised blast design, and monitoring of comminution circuit performance over an extended period approaching two years.

The KCGM comminution circuit comprised a primary crusher, Hydrocone crushers in parallel, a SAG mill with a pebble crusher and finally a ball mill – cyclone circuit.

The first stage of model development for both blasting and comminution models followed the standard approach as outlined for the Porgera study. To achieve finer blast fragmentation, the powder factor was increased by tightening the drill pattern and changing the explosive to a higher VOD emulsion. Blasting practice was changed to a higher powder factor and higher VOD explosive and the long term effects (2 year) were monitored.

| Outcome                  | Design 1 Standard | Design 2 Simulated | Design 1 Simulated |
|--------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Powder factor (Kg/tonne) | 0.58              | 0.66               | 0.96               |
| VOD (m/sec)              | 4550              | 6000               | 6000               |
| SAG Mill tph             | 1250              | 1420               | 1480               |
| Mill tph Increase        |                   | 13.6%              | 18.4%              |

#### Validation after implementation of Test 3 blast design

|   |          |
|---|----------|
| Long term SAG mill throughput with Design 1 | 1100 t/h |
| Long term SAG mill throughput with Design 3 | 1300 t/h |
| Throughput gain                             | 18%      |

## Apéndice 12. Red Dog Operation

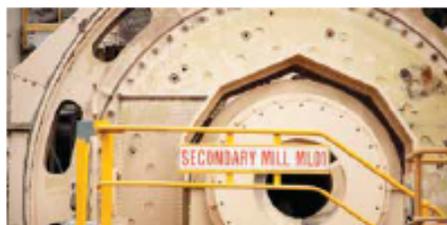
### CASE STUDY #1: Blasting for increased SAG Mill throughput — Example C

#### Site

Red Dog (Alaska, USA)

#### Principal Reference

Paley and Kojovic (2001)



#### Brief summary of application

Over a period of 10 years at the Red Dog mine, blasting practice has been systematically modified and the effects on mill throughput have been studied. This summary covers the initial work. Subsequent developments, principally relating to the introduction of electronic detonators, are described by Paley (2010).

The Red Dog grinding circuit consists of a SAG mill in closed circuit with cyclones followed by a ball mill in closed circuit with cyclones.

Fragmentation and comminution models were developed in the standard manner. Blasting simulations were conducted to assess the effect of changed blast designs on fragmentation and subsequent performance. Results for the standard design (Design 1) and two subsequent blast designs to achieve finer fragmentation which were implemented in the mine are summarised below.

| Outcome                  | Design 1 | Design 2 | Design 3       |
|--------------------------|----------|----------|----------------|
| Explosive                | ANFO     | ANFO     | 70/30 emulsion |
| Powder factor (KG/tonne) | 0.29     | 0.40     | 0.45           |
| SAG Mill tph             | 125      | 132      | 140            |
| Throughput gain          |          | 5.6%     | 12.0%          |

#### Economic impact

Red Dog also conducted an economic analysis of the impact of the changes in blasting and subsequent SAG mill throughput on revenue. The analysis included the effects of increased throughput offset by higher drilling and blasting costs, costs of increased waste removal and reduced concentrate recovery at higher plant throughputs. The annual net revenue gains (estimated at 2000 Zn and Pb prices) are:

|           |        |
|-----------|--------|
| Base case | \$0.0m |
| Design 2  | \$0.0m |
| Design 3  | \$9.2m |

## Apéndice 13. Sandsloot Mine

### CASE STUDY #7: Blasting for improved mining and milling productivity

#### Site

Sandsloot (South Africa)

#### Principal Reference

Bye (2006)

#### Brief summary

A study commenced in 1997 with the objective of improving operational performance in both the open pit mine and the mill by considering the performance of the total mine and mill system rather than the individual parts of the operation. The approach involved geotechnical characterisation of the orebody at a block scale and incorporation of the geotechnical data in the block model.

One of the applications of the enhanced block model was to study the impact of blasting of different blocks on shovel loading rates, fragmentation and subsequent mill throughput. The optimum mean fragmentation sizes for ore and waste were developed which provided a combination of best loading rates and mill throughput, i.e. the optimum sizes took into account the needs of both the mine and the mill. Simple blasting models were developed to allow tailoring of the blast design at block scale to achieve desired fragmentation.

#### Outcome

This work occurred over a number of years. The effects on loading rates and mill throughput are shown in the figures overleaf. The additional blasting cost per tonne of SAG mill throughput was estimated at \$US0.01.

## Apéndice 14. Gol-e-Gohar Mine

# Study of the Effect of Blast Pattern Design on Autogenous and Semi-autogenous Mill Throughput at Gol-e-Gohar Iron Ore Mine

A Hakami<sup>1</sup>, H Mansouri<sup>2</sup>, M A Ebrahimi Farsangi<sup>3</sup>,  
M R Dehghan<sup>4</sup> and F Faramarzi<sup>5</sup>

### ABSTRACT

Today, it is accepted that rock fragmentation by blasting affects loading and hauling operations, and also directly influences on downstream processes such as crushing and grinding. In this research, the influence of rock fragmentation by blasting on the performance of three mills at Gol-e-Gohar iron ore mine No 1 was studied. Firstly, the fragmentation of conventional blast patterns in iron ore (5 × 6 m) was studied using image analysis and the performances of three mills were monitored. Then, a new blast pattern (4 × 5 m) was designed and nine blasts were carried out using this pattern. Increasing the powder factor from 1650 gr/m<sup>3</sup> to 2480 gr/m<sup>3</sup> by changing the blast pattern design showed that mill throughputs increase five per cent to 30 per cent for the new pattern.

### INTRODUCTION

Fragmentation is considered one of the most important results of rock blasting. The influence of fragmentation on the next stages of production cycle such as loading, hauling and on downstream process such as mineral process has been proven. A good fragmentation not only increases production efficiency, but also reduces the total costs of mining process. Studies have shown that the capacity and efficiency of grinding process depends on muck pile size distribution. Therefore, the optimisation of rock fragmentation with regards to mill requirements can contribute to reduce overall cost of mining operations (Kanchibotla, 2003).

Kanchibotla, Valery and Morrell (1999) investigated fines production in blast and their role in crushing and grinding processes in Cadia Hill mine. They presented a suitable model for predicting fragmentation and its impact on the other crushing stages. Grundstrom *et al* (2001) studied the influence of muck pile fragmentation on crusher and mills performances in Porgera gold mine. After carrying out several blast patterns, they observed an increase of 15 per cent in mills throughput by increasing the powder factor. They introduced the Mine to Mill approach and stated that:

*The Mine to Mill blasting approach involves identifying the leverage that blast results have on different downstream*

*processes and then optimising the blast design to achieve the results that maximise the overall profitability rather than individual operations.*

Various researchers (Burger *et al*, 2006; Dance *et al*, 2007; Hart *et al*, 2011) found the impact of blast fragmentation on the downstream process efficiency and costs.

In the present piece of work, the main goal is implementation of mine to mill approach at Gol-e-Gohar iron ore mine No 1 to increase mill throughput.

### SITE DESCRIPTION

Gol-e-Gohar iron ore area is located 55 km south-west of Sirjan and 320 km north-west of Kerman, Iran, between 55°15'40"E and 55°22'33"E longitudes and 29°03'10"N and 29°07'04"N latitudes, at an altitude of 1740 m above sea level (Figure 1). This area contains approximately 1135 Mt of geological iron ore distributed into six anomalies. Among these anomalies, mine No 1, has a reservoir of 310 Mt of iron ore. The mechanical properties of ore and waste were determined by laboratory tests (Table 1).

1. MSc Student, Mining Engineering Department, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran. Email: hakami.lamin@gmail.com
2. Associate Professor, Mining Engineering Department, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran. Email: hmansouri@uk.ac.ir
3. Associate Professor, Mining Engineering Department, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran. Email: maabrahimi@uk.ac.ir
4. MSc Student, Mining Engineering Department, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran. Email: mrazdehghan1686@yahoo.com
5. PhD Candidate, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, The University of Queensland, St Lucia Qld 4072. Email: ffaramarzi@uq.edu.au

## Apéndice 15. Salobo Mine

**Procemin 2016** | 12<sup>th</sup> International Mineral Processing Conference

### Mine to Plant Commissioning in Salobo mine

Jair Alarcon<sup>1</sup>, Ronaldo Fonseca<sup>2</sup>, Grazielle Gontijo<sup>3</sup> and Stephen Jeric<sup>4</sup>

1. *Process Plant Area/Technology Solutions/Orica, Latin America*
2. *Process Area/ Salobo/ Vale, Brazil*
3. *Process Plant Area/Technology Solutions/Orica, Brazil*
4. *Marketing Area/Global Marketing Team/Orica, Global*

#### ABSTRACT

The experience of the authors supports the "Mine to Plant" concept that blasting fragmentation can have a positive impact over the processing plant performance. However, it is very common in industry that when commissioning new plants, the "Mine to Plant" approach is postponed until the plant is running in a steady state condition. Due to the high complexity in the technical analysis to determine the corresponding impact of each initiative initiated in parallel of the plant start-up. By focusing the targets of the mine and plant departments to execute "Mine to Plant" throughout all stages of the operation, the Vale Salobo copper mine in Brazil has effectively demonstrated this concept through the successful implementation of this methodology.

In Q2-2012, the Vale Salobo I (12 Mtpy) initiated its operations. In Q2-2014, Salobo II (24 Mtpy) plant expansion was implemented. Vale began Q1-2015 with the commissioning of the "Mine to Plant" Methodology. This paper presents the results to increase the plant throughput corresponding to the first stage of "Mine to Plant", validating the impacts in every comminution steps: primary crushing, secondary crushing, HPGR and grinding. The key sizes to improve the blasting fragmentation curve in the initial steps of the project: top size, P80 and P50 to minimize the primary crushing delays due to over size material impacting downstream the entire process chain.

In the first 11 months of the "Mine to Plant" implementation, it was determined that the blasting fragmentation increased the throughput 13% in primary crushing, 10% in the secondary crushing and 2% in HPGRs and grinding circuits. Currently work is ongoing to build empirical models that establish the relation of the other key sizes generated from blasting with plant throughput including those related to the fine particle size distribution.

## Apéndice 16. Candelaria Mine

### PROCESS INTEGRATION AND OPTIMISATION AT FREEPORT – MCMORAN CANDELARIA MINE, COPIAPÓ, CHILE

Alfonso Muñoz and Luis Álvarez  
Freeport McMoRan - Candelaria Mine, Chile

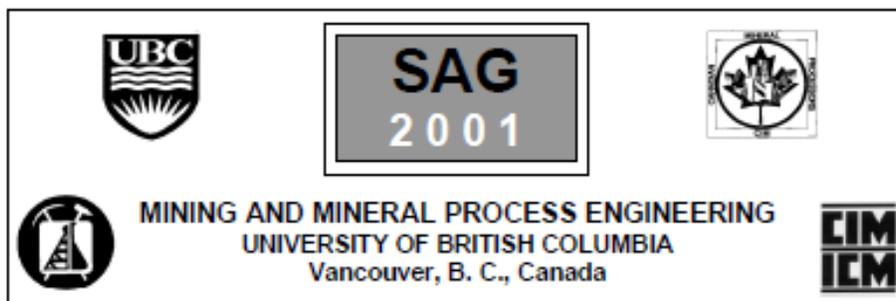
Juliana Colacioppo and Walter Valery  
Metso Minerals - Process Technology, Asia-Pacific and South America

#### ABSTRACT

*Freeport – McMoRan Copper and Gold Inc's Candelaria mine (Candelaria) and Metso Minerals Process Technology Asia-Pacific and South America (MMPT) have conducted a Process Integration and Optimisation (PIO) Project from the Mine-to-Mill to determine what opportunities exist to increase mill throughput and improve the overall mine and concentrator performance. Specifically, this project looked at the process, from in situ ore body characterisation through geological and structural models, blasting practice improvements, ROM fragmentation, crushing and milling optimisation. This paper explains the methodology and details of the implementation of this project.*

## Apéndice 17. Cadia Hill Mine

I-11



### OPTIMISATION OF THE CADIA HILL SAG MILL CIRCUIT

S. Hart <sup>(1)</sup>, W. Valery <sup>(2)</sup>, B Clements <sup>(1)</sup>, M. Reed <sup>(1)</sup>, M. Song <sup>(3)</sup>  
and R. Dunne <sup>(4)</sup>

- (1) Newcrest Mining Ltd Cadia Hill Gold Mine
- (2) Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre
- (3) Conveyor Dynamics Incorporated
- (4) Newcrest Mining Ltd

#### ABSTRACT

Commissioning of the Cadia Hill SAG mill Circuit followed a project Research and Development exercise in July 1998. The SAG mill quickly reached 90% of the design rate but it became evident that the mill would not meet design throughput at the design operating conditions of ball and rock charge, mill speed and power draw. Cadia Hill staff in conjunction with the Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKMRC) then embarked on a series of programs designed to address the shortfall. The process modifications were made with due consideration to maintaining high availability of the single line mill, and were categorised into the following broad areas;

- Manipulation of SAG Mill Operating Parameters (eg. load, ball charge, speed and density)
- Maximising Pebble Recycle Load and Crusher Interaction With the SAG Mill

## Apéndice 18. Resultados de las encuestas

Para el estudio de las variables organizativas se recopiló información a partir de encuestas enviadas tanto a operadores como a consultores especializados en *Mine to Mill*. La encuesta enviada a cada uno de ellos puede verse en el Apéndice 1 y 2. Para el caso de los operadores la encuesta incluyó 21 preguntas mientras que para el caso de los proveedores la encuesta incluyó 35 preguntas. Todas las preguntas realizadas fueron acerca de sus opiniones personales sobre los beneficios y desafíos del *Mine to Mill* que los encuestados han visto a lo largo de sus carreras. Esta información permite ilustrar de forma real lo que sucede con el *Mine to Mill*. En este capítulo se analizarán los resultados de las encuestas.

### Encuesta de *Mine to Mill* – Operadores

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| <b>Objetivo del estudio:</b>         | Recolectar opiniones sobre la implementación y sostenibilidad del <i>Mine to Mill</i> .   |
| <b>Universo:</b>                     | Supervisores Senior y Superintendentes.   |
| <b>Técnica de recolección:</b>       | Encuesta escrita vía e-mail.  |
| <b>Tamaño de muestra:</b>            | 7 personas.   |
| <b>Cuestionario:</b>                 | Estructurado.   |
| <b>Fecha en que se realizó:</b>      | Del 15 de noviembre al 15 de diciembre 2017.  |
| <b>Anonimato y confidencialidad:</b> | Se garantiza el absoluto anonimato de las respuestas de los entrevistados que serán utilizados únicamente para el análisis de dicha encuesta. |

#### 1. ¿En qué año su empresa inició la implementación del *Mine to Mill*?

Las implementaciones fueron desde el 2009 a la fecha.

#### 2. ¿Cuál fue la razón para la implementación del *Mine to Mill*?

Las razones más frecuentes fueron:

- a. Mejorar los indicadores de producción.
- b. Mejorar el control de las variables operativas desde la mina hasta la planta.

- c. Incrementar los finos en la alimentación a molienda.
- d. Optimizar de la capacidad de molienda.

### 3. ¿Qué área de la empresa sugirió la implementación?

De los encuestados, en su totalidad respondieron que el área que sugiere la implementación del Mine to Mill es la planta. Esto probablemente debido a que en su totalidad se trata de personal de planta.

Tabla 1. Resultados encuesta a operadores pregunta 3.

| Criterio    | Frecuencia | %   |
|-------------|------------|-----|
| Gerencia    | 0          | 0   |
| Mina        | 0          | 0   |
| Planta      | 7          | 100 |
| No responde | 0          | 0   |
| Total       | 7          | 100 |

*Nota:* Elaboración propia.

### 4. ¿Qué proveedor les suministró el *Mine to Mill*?

Empresas consultoras de ingeniería, Hatch, Metso y en algunos casos desarrollo interno.

### 5. ¿Cuánto duró la implementación del *Mine to Mill*? Desde el inicio hasta el reporte final.

De los encuestado que respondieron, la mayoría respondió que de seis meses a un año.

Tabla 2. Resultados encuesta a operadores pregunta 5.

| Criterio             | Frecuencia | %   |
|----------------------|------------|-----|
| Menos de 3 meses     | 0          | 0   |
| De 3 a < 6 meses     | 1          | 14  |
| De 6 meses a < 1 año | 4          | 57  |
| Más de 1 año         | 0          | 0   |
| No responde          | 2          | 29  |
| Total                | 7          | 100 |

*Nota:* Elaboración propia.

### 6. ¿Qué beneficios se obtuvieron con la implementación del *Mine to Mill*?

La mayoría responde que se obtiene un incremento en el tonelaje entre 0 a 20%, una reducción de la energía menor a 10%. En recuperación la mayoría responde entre 0 a 10%, asumiendo que puede haberse observado un efecto del P80 en flotación.

Tabla 3. Resultados encuesta a operadores pregunta 6.

| Criterio      | Incremento tonelaje |     | Reducción energía |     | Incremento recuperación |     |
|---------------|---------------------|-----|-------------------|-----|-------------------------|-----|
|               | Frecuencia          | %   | Frecuencia        | %   | Frecuencia              | %   |
| De 0 a < 10%  | 3                   | 43  | 5                 | 71  | 6                       | 86  |
| De 10 a < 20% | 4                   | 57  | 1                 | 14  | 0                       | 0   |
| De 20 a < 30% | 0                   | 0   | 0                 | 0   | 0                       | 0   |
| Igual o >30%  | 0                   | 0   | 0                 | 0   | 0                       | 0   |
| No responde   | 0                   | 0   | 1                 | 14  | 1                       | 14  |
| Total         | 7                   | 100 | 7                 | 100 | 7                       | 100 |

*Nota:* Elaboración propia.

**7. ¿En qué medida las siguientes variables organizacionales influyen en el éxito o fracaso en la implementación de la estrategia del *Mine to Mill*?**

La mayoría de los encuestados responde que el liderazgo de la gerencia general, el trabajo colaborativo entre mina y planta y el alineamiento de los objetivos e indicadores son los tres factores más importantes en la implementación del *Mine to Mill*.

Tabla 4. Resultados encuesta a operadores pregunta 7.

| Criterio    | 1          |     | 2          |     | 3          |     | 4          |     | 5          |     | 6          |     | 7          |     |
|-------------|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|
|             | Frecuencia | %   |
| Muy bajo    | 0          | 0   | 0          | 0   | 1          | 14  | 1          | 14  | 0          | 0   | 0          | 0   | 1          | 14  |
| Bajo        | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 1          | 14  | 0          | 0   | 0          | 0   |
| Medio       | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 1          | 14  | 3          | 43  | 4          | 57  | 3          | 43  |
| Alto        | 2          | 29  | 1          | 14  | 3          | 43  | 2          | 29  | 1          | 14  | 2          | 29  | 1          | 14  |
| Muy alto    | 5          | 71  | 6          | 86  | 3          | 43  | 3          | 43  | 2          | 29  | 1          | 14  | 1          | 14  |
| No responde | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 1          | 14  |
| Total       | 7          | 100 | 7          | 100 | 7          | 100 | 7          | 100 | 7          | 100 | 7          | 100 | 7          | 100 |

*Nota:* Elaboración propia. <sup>1</sup>Liderazgo Gerencia General. <sup>2</sup>Trabajo colaborativo entre Mina – Planta. <sup>3</sup>Alineamiento de los indicadores entre gerencias. <sup>4</sup>Resistencia al cambio. <sup>5</sup>Dificultad para medir los beneficios. <sup>6</sup>Cultura organizacional. <sup>7</sup>No contar con un departamento de integración Mina – Planta].

**8. En su empresa, ¿se ha seguido aplicando el *Mine to Mill* después de la implementación a la fecha?**

Cinco de los siete encuestados informaron que se continuó la implementación.

- Sí (5 encuestados)
- No (1 encuestado)
- No responde (1 encuestado)

**9. ¿En qué medida las siguientes variables organizacionales influyen en el éxito o fracaso en el sostenimiento de la estrategia del *Mine to Mill*?**

Para el sostenimiento de la estrategia del *Mine to Mill*, el principal factor resultó el alineamiento de los objetivos e indicadores seguido del apoyo de la alta gerencia.

Tabla 5. Resultados encuesta a operadores pregunta 9.

| Criterio    | 1          |     | 2          |     | 3          |     | 4          |     | 5          |     | 6          |     | 7          |     |
|-------------|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|
|             | Frecuencia | %   |
| Muy bajo    | 0          | 0   | 0          | 0   | 1          | 14  | 1          | 14  | 0          | 0   | 0          | 0   | 1          | 14  |
| Bajo        | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   |
| Medio       | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 1          | 14  | 3          | 43  | 3          | 43  | 1          | 14  |
| Alto        | 2          | 29  | 0          | 0   | 2          | 29  | 3          | 43  | 2          | 29  | 2          | 29  | 3          | 43  |
| Muy Alto    | 4          | 57  | 6          | 86  | 2          | 29  | 1          | 14  | 1          | 14  | 1          | 14  | 1          | 14  |
| No responde | 1          | 14  | 1          | 14  | 2          | 29  | 1          | 14  | 1          | 14  | 1          | 14  | 1          | 14  |
| Total       | 7          | 100 | 7          | 100 | 7          | 100 | 7          | 100 | 7          | 100 | 7          | 100 | 7          | 100 |

*Nota:* Elaboración propia. <sup>1</sup>Liderazgo Gerencia General. <sup>2</sup>Trabajo en equipo Mina – Planta. <sup>3</sup>Alineamiento de los indicadores entre gerencias. <sup>4</sup>Resistencia al cambio. <sup>5</sup>Dificultad para medir los beneficios. <sup>6</sup>Cultura organizacional. <sup>7</sup>No contar con un departamento de integración Mina – Planta].

### 10. ¿En qué medida los riesgos asociados a la voladura (deslizamiento de tierra, inestabilidad geotécnica, etc) influyeron en la implementación y la sostenibilidad del *Mine to Mill*?

Cuatro de los siete encuestados contestaron que en alta o muy alta medida los riesgos asociados a la voladura influyeron en el sostenimiento e implementación del *Mine to Mill*. Para tres encuestados esta variable influye en un nivel medio y bajo.

Tabla 6. Resultados encuesta a operadores pregunta 10.

| Criterio    | Implementación |     | Sostenimiento |     |
|-------------|----------------|-----|---------------|-----|
|             | Frecuencia     | %   | Frecuencia    | %   |
| Muy bajo    | 0              | 0   | 0             | 0   |
| Bajo        | 1              | 14  | 1             | 14  |
| Medio       | 2              | 29  | 2             | 29  |
| Alto        | 1              | 14  | 1             | 14  |
| Muy Alto    | 3              | 43  | 3             | 43  |
| No responde | 0              | 0   | 0             | 0   |
| Total       | 7              | 100 | 7             | 100 |

*Nota:* Elaboración propia.

### 11. ¿Cuál es el impacto de la dureza del mineral en los siguientes procesos en la implementación del *Mine to Mill*?

Para la mayoría de los encuestados (6 de 7) la dureza del mineral, tema muy abordado en la implementación del *Mine to Mill*, afecta la perforación y voladura en nivel alto y muy alto y la capacidad de planta en un nivel alto y muy alto también.

Tabla 7. Resultados encuesta a operadores pregunta 11.

| Criterio    | Perforación |     | Voladura   |     | Carguío    |     | Acarreo    |     | Capacidad de planta |     |
|-------------|-------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|---------------------|-----|
|             | Frecuencia  | %   | Frecuencia | %   | Frecuencia | %   | Frecuencia | %   | Frecuencia          | %   |
| Muy bajo    | 0           | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0                   | 0   |
| Bajo        | 0           | 0   | 0          | 0   | 3          | 43  | 3          | 43  | 0                   | 0   |
| Medio       | 1           | 14  | 2          | 29  | 3          | 43  | 3          | 43  | 1                   | 14  |
| Alto        | 4           | 57  | 4          | 57  | 1          | 14  | 1          | 14  | 1                   | 14  |
| Muy Alto    | 2           | 29  | 1          | 14  | 0          | 0   | 0          | 0   | 5                   | 71  |
| No responde | 0           | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0                   | 0   |
| Total       | 7           | 100 | 7          | 100 | 7          | 100 | 7          | 100 | 7                   | 100 |

Nota: Elaboración propia.

## 12. ¿Cuál es el impacto de la mayor fragmentación en los siguientes procesos en la implementación del *Mine to Mill*?

De acuerdo a cinco de siete encuestados, la fragmentación lograda por el *Mine to Mill* afecta los procesos de carguío y acarreo de manera positiva. Todos los encuestados responden que la capacidad de planta es afectada en un alto o muy alto nivel.

Tabla 8. Resultados encuesta a operadores pregunta 12.

| Criterio    | Carguío    |     | Acarreo    |     | Desgaste equipo |     | Planta     |     |
|-------------|------------|-----|------------|-----|-----------------|-----|------------|-----|
|             | Frecuencia | %   | Frecuencia | %   | Frecuencia      | %   | Frecuencia | %   |
| Muy bajo    | 0          | 0   | 0          | 0   | 0               | 0   | 0          | 0   |
| Bajo        | 1          | 14  | 1          | 14  | 1               | 14  | 0          | 0   |
| Medio       | 1          | 14  | 1          | 14  | 3               | 43  | 0          | 0   |
| Alto        | 5          | 71  | 4          | 57  | 3               | 43  | 1          | 14  |
| Muy Alto    | 0          | 0   | 0          | 0   | 0               | 0   | 6          | 86  |
| No responde | 0          | 0   | 1          | 14  | 0               | 0   | 0          | 0   |
| Total       | 7          | 100 | 7          | 100 | 7               | 100 | 7          | 100 |

Nota: Elaboración propia.

## 13. ¿En qué grado limita cada una de las siguientes variables en el incremento de la cantidad de explosivos en la fragmentación?

Para los encuestados, la mayor limitante para el uso de explosivos son los aspectos geotécnicos. El incremento del costo unitario de voladura queda en un segundo lugar.

Tabla 9. Resultados encuesta a operadores pregunta 13.

| Criterio    | Geotécnia  |     | Acarreo    |     | Costo voladura |     |
|-------------|------------|-----|------------|-----|----------------|-----|
|             | Frecuencia | %   | Frecuencia | %   | Frecuencia     | %   |
| Muy bajo    | 0          | 0   | 0          | 0   | 0              | 0   |
| Bajo        | 1          | 14  | 2          | 29  | 0              | 0   |
| Medio       | 1          | 14  | 5          | 71  | 2              | 29  |
| Alto        | 0          | 0   | 0          | 0   | 4              | 57  |
| Muy Alto    | 5          | 71  | 0          | 0   | 1              | 14  |
| No responde | 0          | 0   | 0          | 0   | 0              | 0   |
| Total       | 7          | 100 | 7          | 100 | 7              | 100 |

Nota: Elaboración propia.

**14. El hecho de que dos gerencias diferentes participen en esta implementación del *Mine to Mill* ¿Presentó alguna dificultad en la sostenibilidad del proyecto? ¿En qué grado?**

Tres de siete encuestados contestó que el hecho que dos gerencias participen en la implementación presentó una dificultad en temas organizacionales y operativos del *Mine to Mill*. El aspecto económico no fue considerado como un factor que afecte la sostenibilidad.

Tabla 10. Resultados encuesta a operadores pregunta 14.

| Criterio    | Organizacionales |     | Operacionales |     | Económicos |     | Técnicos   |     |
|-------------|------------------|-----|---------------|-----|------------|-----|------------|-----|
|             | Frecuencia       | %   | Frecuencia    | %   | Frecuencia | %   | Frecuencia | %   |
| Muy bajo    | 0                | 0   | 0             | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   |
| Bajo        | 2                | 29  | 2             | 29  | 2          | 29  | 2          | 29  |
| Medio       | 1                | 14  | 1             | 14  | 2          | 29  | 1          | 14  |
| Alto        | 3                | 43  | 3             | 43  | 1          | 14  | 2          | 29  |
| Muy Alto    | 0                | 0   | 0             | 0   | 1          | 14  | 1          | 14  |
| No responde | 1                | 14  | 1             | 14  | 1          | 14  | 1          | 14  |
| Total       | 7                | 100 | 7             | 100 | 7          | 100 | 7          | 100 |

Nota: Elaboración propia.

**15. ¿Cuál de estas variables técnicas son las que más impactan en los resultados de *Mine to Mill*? ¿En qué grado?**

Todas estas variables técnicas son de importancia en el *Mine to Mill*. Sin embargo, para los encuestados la de mayor impacto es el grado de fragmentación requerido que es el que más afecta en el éxito del *Mine to Mill*.

Tabla 11. Resultados encuesta a operadores pregunta 15.

| Criterio    | Tipo yacimiento |     | Grado fragmentación |     | Dureza mineral |     | Tecnología conminución |     |
|-------------|-----------------|-----|---------------------|-----|----------------|-----|------------------------|-----|
|             | Frecuencia      | %   | Frecuencia          | %   | Frecuencia     | %   | Frecuencia             | %   |
| Muy bajo    | 0               | 0   | 0                   | 0   | 0              | 0   | 0                      | 0   |
| Bajo        | 0               | 0   | 0                   | 0   | 0              | 0   | 0                      | 0   |
| Medio       | 1               | 14  | 0                   | 0   | 2              | 29  | 0                      | 0   |
| Alto        | 4               | 57  | 2                   | 29  | 2              | 29  | 6                      | 86  |
| Muy Alto    | 2               | 29  | 5                   | 71  | 3              | 43  | 1                      | 14  |
| No responde | 0               | 0   | 0                   | 0   | 0              | 0   | 0                      | 0   |
| Total       | 7               | 100 | 7                   | 100 | 7              | 100 | 7                      | 100 |

Nota: Elaboración propia.

**16. ¿Por favor indique qué metal se explota en su operación y qué método de explotación se usa?**

En su gran mayoría los encuestados pertenecen a la gran minería de cobre.

Tabla 12. Resultados encuesta a operadores pregunta 16.

| Criterio     | Tajo abierto |     | Subterráneo |   | Mixto      |   |
|--------------|--------------|-----|-------------|---|------------|---|
|              | Frecuencia   | %   | Frecuencia  | % | Frecuencia | % |
| Cobre        | 6            | 86  | 0           | 0 | 0          | 0 |
| Oro          | 0            | 0   | 0           | 0 | 0          | 0 |
| Hierro       | 0            | 0   | 0           | 0 | 0          | 0 |
| Polimetálico | 1            | 14  | 0           | 0 | 0          | 0 |
| No responde  | 0            | 0   | 0           | 0 | 0          | 0 |
| Total        | 7            | 100 | 0           | 0 | 0          | 0 |

*Nota:* Elaboración propia.

**17. ¿Cuánto costó la implementación del *Mine to Mill* y en cuánto tiempo se recuperó la inversión?**

Según los resultados de las encuestas la inversión oscila alrededor de 200 KUS\$ y se recupera en menos de tres meses.

**18. ¿Recomendaría usted la implementación del *Mine to Mill* a las empresas mineras?**

De los encuestados en su totalidad respondieron que sí recomendarían la implementación del *Mine to Mill*. Todos parecen estar convencidos de la utilidad del *Mine to Mill* aun cuando en uno de los casos ya no se sigue aplicando.

**19. ¿Se evaluaron otras alternativas al *Mine to Mill*, por ejemplo, pre-chancado?**

- Sí (4 encuestados)
- No (3 encuestados)
- No responde (0 encuestados)

Para los que respondieron sí, se evaluó la etapa de pre-chancado, sin embargo, fue descartada. Algunos consideran el pre-chancado dentro del concepto del *Mine to Mill*, para otros no tiene relación.

**20. ¿Se cuantificaron otros beneficios ocultos? Tales como mejora en el acarreo, carguío, etc.**

- Sí (3 encuestado)
- No (2 encuestados)
- No responde (2 encuestados)

Para los que respondieron sí, sólo un encuestado lo tiene cuantificado, los otros 2 se encuentran en evaluación.

**21. Basado en su experiencia, ¿cree usted que el *Mine to Mill* puede ser aplicado a todas las minas?**

Los principales comentarios fueron:

- a. Dependiendo del yacimiento y su geotecnia.
- b. Cada mina es un caso particular.
- c. Se puede considerar como una oportunidad de mejora.

Prácticamente se tiene consenso en que la aplicación del *Mine to Mill* depende mucho de la particularidad de la mina pero que siempre es posible obtener una mejora.

**22. ¿Tiene alguna otra idea que considere importante de incluir en este estudio?**

Las recomendaciones adicionales que se recogieron de las encuestas:

- a. Extender las ideas de integración, no solo conminución, sino también la flotación e incluso llegar hasta la comercialización.
- b. El uso de la tecnología como pieza clave en el desarrollo del *Mine to Mill* (ayuda de simuladores).

**Encuesta de *Mine to Mill* – Proveedores**

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| <b>Objetivo del estudio:</b>         | Recolectar opiniones sobre la implementación y sostenibilidad del <i>Mine to Mill</i> .   |
| <b>Universo:</b>                     | Consultores y Proveedores de <i>Mine to Mill</i> .  |
| <b>Técnica de recolección:</b>       | Encuesta escrita vía e-mail.  |
| <b>Tamaño de muestra:</b>            | 9 personas.   |
| <b>Cuestionario:</b>                 | Estructurado.   |
| <b>Fecha en que se realizó:</b>      | Del 15 de noviembre al 15 de diciembre.   |
| <b>Anonimato y confidencialidad:</b> | Se garantiza el absoluto anonimato de las respuestas de los entrevistados que serán utilizados únicamente para el análisis de dicha encuesta. |

**1. La empresa que forma parte, ¿a partir de qué año empezó a dar soporte de *Mine to Mill* a nivel comercial?**

- a. Los consultores entrevistados en su mayoría empezaron con el servicio mine to mill entre el año 2000 y 2010.
- b. Sin embargo, uno de los encuestados participó en el desarrollo de la metodología desarrollada por JKTech en el año 1996 como parte del programa AMIRA P483. Hubo una conferencia *Mine to Mill* en 1998.

**2. Normalmente, ¿qué área hace la solicitud de implementación de *Mine to Mill*?**

Para el caso de proveedores, la solicitud de implementación viene de varias áreas, siendo en su mayor parte de la gerencia general (4 de 11 encuestados). Esto difiere de lo observado con los operadores, donde en su totalidad venía de la planta.

Tabla 1. Resultados encuesta a proveedores pregunta 2.

| Criterio  | Frecuencia | %   |
|-----------|------------|-----|
| Gerencia  | 4          | 36  |
| Mina      | 2          | 18  |
| Planta    | 3          | 27  |
| Otra área | 2          | 18  |
| Total     | 11         | 100 |

*Nota:* Elaboración propia.

**3. ¿Cuál es el mayor mercado mundial de los estudios de *Mine to Mill*? Dentro de este, ¿algún nicho en especial?, tal vez por metal: Hierro, Cobre, Platino, entre otros.**

Tabla 2. Resultados encuesta a proveedores pregunta 3.

| Criterio | Frecuencia | %   |
|----------|------------|-----|
| África   | 1          | 9   |
| Oceanía  | 2          | 18  |
| Asia     | 2          | 18  |
| Europa   | 0          | 0   |
| América  | 6          | 55  |
| Total    | 11         | 100 |

*Nota:* Elaboración propia.

Tabla 3. Resultados encuesta a proveedores pregunta 3.

| Criterio      | Frecuencia | %   |
|---------------|------------|-----|
| Polimetálicos | 1          | 11  |
| Cobre         | 5          | 56  |
| Hierro        | 0          | 0   |
| Oro           | 1          | 11  |
| No responde   | 2          | 22  |
| Total         | 9          | 100 |

*Nota:* Elaboración propia.

Para la mayoría de los encuestados, el mayor mercado está en América y en minería de cobre.

#### 4. ¿En qué rango de valor puede ser cotizado el desarrollo de *Mine to Mill*?

De acuerdo a las respuestas de los encuestados, el valor oscila entre los 300 KUS\$.

Valor mayor al de los operadores dado el mayor espectro abarcado.

Tabla 4. Resultados encuesta a proveedores pregunta 4.

| Criterio            | Frecuencia | %   |
|---------------------|------------|-----|
| Menos de 100K, \$   | 1          | 11  |
| De 100 a < 200K, \$ | 1          | 11  |
| De 200 a < 300K, \$ | 3          | 33  |
| Más de 300K,\$      | 4          | 44  |
| No responde         | 0          | 0   |
| Total               | 9          | 100 |

*Nota:* Elaboración propia.

#### 5. ¿Cuánto demora normalmente la implementación del *Mine to Mill*?

La implementación de la estrategia *Mine to Mill* se esperaría que sea como máximo en un año.

Tabla 5. Resultados encuesta a proveedores pregunta 5.

| Criterio             | Frecuencia | %   |
|----------------------|------------|-----|
| Menos de 3 meses     | 0          | 0   |
| De 3 a < 6 meses     | 5          | 56  |
| De 6 meses a < 1 año | 3          | 33  |
| Más de 1 año         | 1          | 11  |
| No responde          | 0          | 0   |
| Total                | 9          | 100 |

*Nota:* Elaboración propia.

#### 6. ¿Cuál es el entregable que el cliente espera del proveedor?

De acuerdo a los encuestados el principal entregable de una implementación *Mine to Mill* es:

- c. Incremento en los beneficios económicos.

- e. Incremento de tonelaje y reducción de la energía.
- f. Reducción de los costos globales \$/t.
- g. Visión de integración de procesos.

Todos coinciden en que la implementación de la estrategia *Mine to Mill* debe traer como consecuencia en general un incremento de beneficios económicos el cual puede ser logrado por medio del incremento de tonelaje, reducción de los consumos energéticos y en general de los costos globales. A su vez esta implementación debe también entregar a la organización, las bases para una visión integradora que perdure en el tiempo.

**7. En su experiencia, ¿cuáles son los mayores beneficios cuantificables (tonelaje, energía, recuperación) producidos cuando se implementa de manera exitosa un *Mine to Mill*? Indique qué porcentaje de mejora se produjo.**

Tabla 6. Resultados encuesta a proveedores pregunta 7.

| Criterio      | Incremento tonelaje |     | Reducción energía |     | Incremento recuperación |     |
|---------------|---------------------|-----|-------------------|-----|-------------------------|-----|
|               | Frecuencia          | %   | Frecuencia        | %   | Frecuencia              | %   |
| De 0 a < 10%  | 4                   | 44  | 6                 | 67  | 6                       | 67  |
| De 10 a < 20% | 3                   | 33  | 2                 | 22  | 0                       | 0   |
| De 20 a < 30% | 2                   | 22  | 1                 | 11  | 0                       | 0   |
| Igual o >30%  | 0                   | 0   | 0                 | 0   | 0                       | 0   |
| No responde   | 0                   | 0   | 0                 | 0   | 3                       | 33  |
| Total         | 9                   | 100 | 9                 | 100 | 9                       | 100 |

*Nota:* Elaboración propia.

Los comentarios recogidos fueron:

- a. Normalmente el beneficio en tonelaje es menor al 10%. En caso se dé más que ello la operación se encontraba muy lejos del óptimo
- b. En los *Mine to Mill* bien evaluados no se tiene beneficios económicos en energía dado que el mayor tonelaje procesado implica gastos adicionales en bolas. No se tiene en absoluto mejoras en recuperación. Uno de los encuestados opinó de esa manera.
- c. Si se enfoca únicamente en incremento de tonelaje, el *Mine to Mill* tiende a producir granulometrías más gruesas a flotación en perjuicio de la recuperación.
- d. En general, se tiene beneficios de tonelaje menores al 10%. A veces se ha tenido incrementos de hasta 18% pero con trabajo conjunto de optimización de

- molienda. La recuperación depende de cuánto trabajo se haga en la optimización del producto de molienda.
- e. En general el *Mine to Mill* se enfoca en incrementar tonelaje, por lo cual no se ve reducción del consumo de energía global (kw-h/día). Sin embargo, lo que se ve es reducción del consumo de energía específico en la etapa SAG (kw-h/t).
  - f. La recuperación tiende a caer por que los *Mine to Mill* tienden a producir productos más gruesos a flotación.
  - g. Generalmente no se tiene mejoras en la recuperación cuando se aumenta tonelaje a menos que se cuente con equipos adicionales.

Se tienen opiniones divididas respecto a los que se refiere a incremento en recuperación. Tres encuestados manifiestan no tener en absoluto mejoras en recuperación.

**8. Después de la implementación del *Mine to Mill*, de acuerdo a su experiencia, ¿qué porcentaje de clientes tienen éxito en el sostenimiento del *Mine to Mill* en el largo plazo?**

Tabla 7. Resultados encuesta a proveedores pregunta 8.

| Criterio      | Frecuencia | %   |
|---------------|------------|-----|
| Menos del 20% | 5          | 56  |
| De 20 a < 50% | 3          | 33  |
| De 50 a < 75% | 0          | 0   |
| De 75 a 100%  | 1          | 11  |
| No responde   | 0          | 0   |
| Total         | 9          | 100 |

*Nota:* Elaboración propia.

Los comentarios fueron:

- a. Muchos *Mine to Mill* fracasan debido a sobre expectativas derivadas de un pobre conocimiento de su propio proceso. No es suficiente con incrementar la voladura y chancar más intensamente. Todo el circuito debe estar preparado para asumir los posibles cuellos de botella que se generaran.
- b. El fracaso de los *Mine to Mill* en el tiempo se debe a cortes en los presupuestos. La mina reduce los costos de perforación y voladura sin coordinar con la planta.

- c. Normalmente se tiene una o dos personas que se encargan en la mina del *Mine to Mill*. Si ellas dejan la organización o si hay un cambio de gerencia el *Mine to Mill* deja de implementarse.
- d. La variabilidad del mineral en el tiempo hace complicado mantener los mismos parámetros fijados en el estudio inicial y solo se tiene éxito cuando este ha sido realizado en base al LOM.
- e. Casi ninguna mina ha sido capaz de mantener los beneficios iniciales del *Mine to Mill* por falta de trabajo colaborativo y no poder lograr que esta filosofía se vuelva parte de la cultura de la organización.
- f. Se tiene éxito en la mayoría de los casos, siempre y cuando se implementen las recomendaciones indicadas en el estudio base.

**9. ¿En qué medida las siguientes variables organizacionales influyen en el éxito o fracaso en la implementación de la estrategia del *Mine to Mill*? Marque los necesarios.**

Tabla 8. Resultados encuesta a proveedores pregunta 9.

| Criterio    | 1          |     | 2          |     | 3          |     | 4          |     | 5          |     | 6          |     | 7          |     |
|-------------|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|
|             | Frecuencia | %   |
| Muy bajo    | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 2          | 22  | 1          | 11  | 1          | 11  |
| Bajo        | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 1          | 11  | 1          | 11  | 2          | 22  | 3          | 33  |
| Medio       | 1          | 11  | 1          | 11  | 2          | 22  | 2          | 22  | 4          | 44  | 4          | 44  | 4          | 44  |
| Alto        | 3          | 33  | 4          | 44  | 4          | 44  | 3          | 33  | 1          | 11  | 0          | 0   | 1          | 11  |
| Muy alto    | 5          | 56  | 4          | 44  | 3          | 33  | 3          | 33  | 1          | 11  | 2          | 22  | 0          | 0   |
| No responde | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   |
| Total       | 9          | 100 | 9          | 100 | 9          | 100 | 9          | 100 | 9          | 100 | 9          | 100 | 9          | 100 |

*Nota:* Elaboración propia. <sup>1</sup>Liderazgo Gerencia General. <sup>2</sup>Trabajo en equipo Mina – Planta. <sup>3</sup>Desalineamiento de los KPI entre gerencias. <sup>4</sup>Resistencia al cambio. <sup>5</sup>Dificultad para medir los beneficios. <sup>6</sup>Cultura organizacional. <sup>7</sup>No contar con un departamento de integración Mina – Planta].

Los comentarios fueron:

- a. Las variables 1, 2, 3 y 4 influyen en grado similar.
- b. El trabajo en equipo debe implicar el nombramiento de un responsable directo en mina y planta.
- c. Lo más importante es el soporte de la alta gerencia y el trabajo en equipo mina-planta. El *Mine to Mill* no solo debe enfocarse en los explosivos. Ese enfoque le hace perder el valor para el cliente.
- d. El principal problema viene de la naturaleza humana que tiende a propulsar las ideas que le conviene. La dificultad para medir los beneficios de manera tangible

contribuye a este hecho dado que no se puede determinar con exactitud cuáles fueron los beneficios del *Mine to Mill* lo cual hace que no se cumplan las expectativas de algunos grupos de interés.

**10. ¿En qué medida las siguientes variables organizacionales influyen en el éxito o fracaso en el sostenimiento de la estrategia del *Mine to Mill*? Marque los necesarios.**

Tabla 9. Resultados encuesta a proveedores pregunta 10.

| Criterio    | 1          |     | 2          |     | 3          |     | 4          |     | 5          |     | 6          |     | 7          |     |
|-------------|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|
|             | Frecuencia | %   |
| Muy bajo    | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 1          | 11  | 0          | 0   | 0          | 0   |
| Bajo        | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 1          | 11  | 0          | 0   | 1          | 11  | 0          | 0   |
| Medio       | 0          | 0   | 1          | 11  | 1          | 11  | 3          | 33  | 3          | 33  | 1          | 11  | 4          | 44  |
| Alto        | 1          | 11  | 2          | 22  | 2          | 22  | 0          | 0   | 0          | 0   | 2          | 22  | 0          | 0   |
| Muy alto    | 3          | 33  | 1          | 11  | 1          | 11  | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   |
| No responde | 5          | 56  | 5          | 56  | 5          | 56  | 5          | 56  | 5          | 56  | 5          | 56  | 5          | 56  |
| Total       | 9          | 100 | 9          | 100 | 9          | 100 | 9          | 100 | 9          | 100 | 9          | 100 | 9          | 100 |

*Nota:* Elaboración propia. [<sup>1</sup>Liderazgo Gerencia General. <sup>2</sup>Trabajo en equipo Mina – Planta. <sup>3</sup>Desalineamiento de los KPI entre gerencias. <sup>4</sup>Resistencia al cambio. <sup>5</sup>Dificultad para medir los beneficios. <sup>6</sup>Cultura organizacional. <sup>7</sup>No contar con un departamento de integración Mina – Planta].

Los comentarios fueron:

- Un aspecto importante que se tiene que tener en consideración para la sostenibilidad del *Mine to Mill* es el conocimiento de la variabilidad de la dureza. Los modelos de bloques que normalmente se tienen solo consideran atributos como la ley, recuperación, litología sin contener una buena resolución en lo que es dureza.
- Los beneficios del *Mine to Mill* son fácilmente medibles. Por ejemplo, el tonelaje se puede medir fácilmente el antes y el después. Lo mismo con el consumo de energía específico se puede medir antes y después, costos operacionales, etc.
- Si la mina está cerca a su fin de vida no vale la pena implementar *Mine to Mill*.

**11. ¿En qué medida los riesgos asociados a la voladura (deslizamientos de tierra, inestabilidad geotécnica, etc.) influyeron en la implementación y la sostenibilidad de *Mine to Mill*?**

Tabla 10. Resultados encuesta a proveedores pregunta 11.

| Criterio    | Implementación |     | Sostenimiento |     |
|-------------|----------------|-----|---------------|-----|
|             | Frecuencia     | %   | Frecuencia    | %   |
| Muy bajo    | 0              | 0   | 1             | 11  |
| Bajo        | 3              | 33  | 2             | 22  |
| Medio       | 4              | 44  | 2             | 22  |
| Alto        | 1              | 11  | 3             | 33  |
| Muy Alto    | 1              | 11  | 1             | 11  |
| No responde | 0              | 0   | 0             | 0   |
| Total       | 9              | 100 | 9             | 100 |

*Nota:* Elaboración propia.

Acerca de la influencia de los riesgos asociados a la voladura en la implementación y sostenibilidad, las opiniones fueron:

- a. Es bastante difícil en estos tiempos encontrar una operación que quiera sacrificar seguridad por los beneficios de un incremento de tonelaje.
- b. La falta de conocimiento técnico lleva a realizar voladuras conservadoras. Con un buen entrenamiento técnico esto puede ser manejado.
- c. *Mine to Mill* se basa en estrategias operacionales que parten del análisis de la roca. La energía de los explosivos se basa en estas propiedades y además en las necesidades del proceso aguas abajo pero además cumpliendo condiciones geotécnicas. No hay necesidad de incrementar energía siempre.
- d. Muy frecuentemente los riesgos geotécnicos pueden ser mitigados, pero son usados como una barrera para el cambio
- e. En el estudio se realiza control de las vibraciones para medir el impacto de la alta intensidad en la estabilidad geotécnica.

En realidad, para los consultores y proveedores, los aspectos geotécnicos pueden ser manejados y no debería ser una variable definitiva que dificulte la implementación del *Mine to Mill*, esto a diferencia de la opinión de los operadores para quienes los aspectos geotécnicos eran cruciales. Esto debido a que en muchas operaciones se extrema el control geotécnico por temas de seguridad o por algún antecedente de derrumbes.

**12. El hecho que dos o más gerencias participen en la implementación, ¿hace más difícil la sostenibilidad del proyecto? Explique ¿por qué?**

Tabla 11. Resultados encuesta a proveedores pregunta 12.

| Criterio    | Organizacionales |     | Operacionales |     | Económicos |     | Técnicos   |     |
|-------------|------------------|-----|---------------|-----|------------|-----|------------|-----|
|             | Frecuencia       | %   | Frecuencia    | %   | Frecuencia | %   | Frecuencia | %   |
| Muy bajo    | 0                | 0   | 0             | 0   | 0          | 0   | 2          | 22  |
| Bajo        | 2                | 22  | 1             | 11  | 4          | 44  | 2          | 22  |
| Medio       | 3                | 33  | 4             | 44  | 3          | 33  | 2          | 22  |
| Alto        | 2                | 22  | 2             | 22  | 0          | 0   | 1          | 11  |
| Muy Alto    | 0                | 0   | 0             | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   |
| No responde | 2                | 22  | 2             | 22  | 2          | 22  | 2          | 22  |
| Total       | 9                | 100 | 9             | 100 | 9          | 100 | 9          | 100 |

*Nota:* Elaboración propia.

Respecto al hecho de la participación de dos o más gerencias comentaron lo siguiente:

- a. En general las gerencias siempre están claras que el objetivo de la ganancia global del negocio.
- b. El trabajo en equipo y los esfuerzos conjuntos es la esencia del *Mine to Mill*.
- c. Un estudio integrado requiere trabajo en equipo y reconocer que cada profesional tiene trabajo que hacer. Compartir esta información para un objetivo global.
- d. Influencia que existan dos áreas puesto que siempre rivalizaran por quien se atribuye el logro.
- e. La comunicación y los indicadores compartidos es muy importante.

Solo dos encuestados le dieron valor alto al aspecto organizacional y operativo, al analizar la participación de dos gerencias. Para los Operadores este aspecto fue considerado de mayor importancia.

**13. De lo expuesto en la pregunta 12, ¿qué solución se le puede dar? ¿qué experiencias positivas respecto a este punto ha podido observar?**

Las soluciones propuestas por los encuestados son:

- a. Indicadores de producción bien establecidos que reflejen la performance de toda la operación. Indicadores más globales.
- b. Entendimiento de los aspectos de la operación a mayor detalle incluyendo la opción de intercambio de rotación de personal para generar empatía.
- c. Formación de equipos interdisciplinarios que gestionen el *Mine to Mill*.
- d. Apoyo de la alta gerencia, esta tiene un efecto unificante.

**14. Para los casos donde se haya tenido éxito en la sostenibilidad del *Mine to Mill*, ¿qué factor explica el resultado?**

Según los encuestados, el éxito en la sostenibilidad del *Mine to Mill* se debe a:

- a. Apoyo de la alta gerencia. Conciencia de esta de los buenos resultados que se obtienen.
- b. Monitoreo constante de las condiciones de mineral para ir haciendo los ajustes respectivos al *Mine to Mill*.
- c. Inclusión de las prácticas *Mine to Mill* dentro de procedimientos establecidos.
- d. Mantener al personal al día en lo referente a *Mine to Mill* manteniendo el entusiasmo.
- e. *Mine to Mill* llega a convertirse parte de la cultura de la organización.
- f. Coordinación adecuada e indicadores de producción adecuadamente definidos.

**15. Para los casos donde se haya fracasado en la sostenibilidad del *Mine to Mill*, ¿qué factor explica el resultado?**

De acuerdo a los encuestados, las fallas en la sostenibilidad del *Mine to Mill* se deben:

- a. Fallas en el diseño original implementado.
- b. Operaciones que han estado muy cerca a lo óptimo en referencia a fragmentación.
- c. Falta de conocimiento por parte del proveedor implementando recomendaciones que no son aplicables.
- d. Factores personales, políticos, intereses particulares, etc. Partida de la empresa de la persona impulsora (champion).
- e. Temas del flowsheet que no permite aprovechar en el largo plazo la mejor fragmentación.
- f. Falta de compromiso de la gerencia general o de la mina.
- g. Indicadores mal definidos y falta de información de calidad para monitoreo.
- h. No se integró la filosofía *Mine to Mill* en las prácticas y valores.

**16. ¿Qué empresa puede ser considerada ejemplo de éxito en la implementación del *Mine to Mill*? Explique.**

Para los encuestados, los mejores ejemplos de mine to mill son Antamina, Batu Hiaju, Highland Valley Copper, Barrick, Paddington obviamente dentro del universo de resultados publicados.

**17. ¿Se tiene diferencias en la implementación del *Mine to Mill* a través del mundo? ¿Hay mayor tasa de éxito en alguna zona en particular? Por ejemplo, Australia, Canadá u otros. Si usted opina que hay diferencias, explique ¿por qué?**

Para los encuestados, las zonas con mayores éxitos en la implementación del *Mine to Mill*:

- a. Depende de los estándares de operación de la zona, tales como Asia o Medio oriente tienen potenciales mayores de beneficio con *Mine to Mill*.
- b. Australia, dado que la metodología se conoce hace ya varias décadas. Canadá igual y Latinoamérica solo en operaciones de gran minería.
- c. Áreas donde se tengan operaciones grandes con recursos para invertir en optimización tal como *Mine to Mill*.
- d. Chile

**18. ¿La tecnología de conminución influye en los resultados? Es decir, ¿los beneficios esperados cambiarían si son plantas que usan molienda convencional, SAG o HPGR? Por favor comente.**

Referente a la tecnología de conminución, los encuestados contestaron:

- a. Principalmente el SAG, dado que otras plantas en las etapas de chancado se amortigua el efecto. La operación del SAG es muy sensible a los cambios de dureza y de fragmentación. En otras tecnologías como HPGR y chancado la operación es más estable y las mejoras más discretas.
- b. Se puede aplicar a cualquier tecnología dado que se realizan modelos matemáticos adecuados a cada realidad.

**19. ¿El tipo de yacimiento influye en los resultados? Es decir, ¿los beneficios esperados cambiarían para yacimientos tipo pórfido, skarn, VMS, IOGC, entre otros? Por favor comente.**

Referente al tipo de yacimiento y su influencia en *Mine to Mill* se obtuvieron las siguientes respuestas:

- a. Se requieren ciertas condiciones para ver beneficios evidentes en el *Mine to Mill*.
- b. El *Mine to Mill* es altamente beneficioso para minerales competentes y de alta dureza sin importar el yacimiento.
- c. Los yacimientos con mayor variabilidad son los que más se benefician con el *Mine to Mill*.

**20. ¿El tipo de mineral influye en los resultados? Es decir, ¿los beneficios esperados cambiarían si explota Hierro, Oro o Cobre? Por favor comente.**

Se preguntó a los encuestados si se tiene diferentes resultados dependiendo el mineral que se procese: Cu, Fe, etc.

- a. No influye, solo las propiedades de la roca.
- b. Solo interesa la competencia de la roca, no importa si es oro, cobre, etc.
- c. Se tiene mayor tendencia a las operaciones de cobre y oro debido al tamaño de las operaciones.

**21. ¿Se puede implementar el *Mine to Mill* en minas subterráneas? Si la respuesta es negativa, por favor explique ¿por qué?**

Respecto a la posibilidad de aplicar *Mine to Mill* en minas subterráneas los encuestados contestaron:

- No, por el volumen que se aplica (1 encuestado)
- Sí, absolutamente (8 encuestados)

Sus opiniones fueron:

- a. La filosofía *Mine to Mill* es aplicable no solo a fragmentación, también involucra aspectos de conocimiento mina y planta.
- b. La selección de los bloques de voladura en la mina ya es un ejemplo de *Mine to Mill*.
- c. Solo es aplicable a método de cámaras y pilares donde se tiene control de la voladura. En otros métodos como hundimiento de bloque se harían muy difícil.
- d. Sí es aplicable, pero con alcances limitados.
- e. Sí es aplicable, pero tendría que orientarse diferente dado que el costo de minado en una mina subterránea es muy alto en comparación de planta. Habría que orientarlo a disminuir el costo del minado manteniendo la productividad.

**22. Si la respuesta es sí, ¿Cuál es el objetivo del *Mine to Mill* en las minas subterráneas? ¿Incremento en el tonelaje?, ¿Reducción de energía?, etc. Por favor comente.**

El beneficio esperado en una mina subterránea es:

- El mismo: mejora de fragmentación.
- Depende del cliente, puede ser reducción de costos, etc.
- Reducción de costos de la mina sin sacrificar la productividad.

**23. ¿Conviene la implementación del estudio para plantas pequeñas (menores a 5000 thp)? Si la respuesta es negativa, ¿Por qué?**

Respecto a la aplicación en plantas pequeñas:

- Sí (8 encuestados)
- No (1 encuestado)

Los comentarios principales:

- Las plantas pequeñas tienen mayor restricción de capital, por lo tanto, la aplicación de *Mine to Mill* debe ser de acuerdo a evaluación técnico económica.
- Las plantas pequeñas operan en rangos de operación más limitados, por lo tanto, la aplicación de *Mine to Mill* puede orientarse a otro enfoque como la reducción de energía, costos, etc.
- Las plantas pequeñas tienen mayor rango de optimización porque corren fuera del óptimo.

**24. ¿Cuál es el impacto de la dureza del mineral en los siguientes procesos en la implementación del *Mine to Mill*?**

Tabla 12. Resultados encuesta a proveedores pregunta 24.

| Criterio    | Perforación |     | Voladura   |     | Carguío    |     | Acarreo    |     | Capacidad de planta |     |
|-------------|-------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|---------------------|-----|
|             | Frecuencia  | %   | Frecuencia | %   | Frecuencia | %   | Frecuencia | %   | Frecuencia          | %   |
| Muy bajo    | 0           | 0   | 0          | 0   | 0          | 0   | 2          | 22  | 0                   | 0   |
| Bajo        | 0           | 0   | 0          | 0   | 1          | 11  | 2          | 22  | 0                   | 0   |
| Medio       | 3           | 33  | 3          | 33  | 1          | 11  | 0          | 0   | 0                   | 0   |
| Alto        | 3           | 33  | 2          | 22  | 3          | 33  | 1          | 11  | 4                   | 44  |
| Muy Alto    | 2           | 22  | 3          | 33  | 1          | 11  | 1          | 11  | 5                   | 56  |
| No responde | 1           | 11  | 1          | 11  | 3          | 33  | 3          | 33  | 0                   | 0   |
| Total       | 9           | 100 | 9          | 100 | 9          | 100 | 9          | 100 | 9                   | 100 |

*Nota:* Elaboración propia.

Todos los encuestados creen que la dureza del mineral tiene un impacto alto o muy alto en la capacidad de la planta.

**25. ¿Cuál es el impacto de la mayor fragmentación en *Mine to Mill*?**

Tabla 13. Resultados encuesta a proveedores pregunta 25.

| Criterio    | Carguío    |     | Acarreo    |     | Desgaste equipo |     | Planta     |     |
|-------------|------------|-----|------------|-----|-----------------|-----|------------|-----|
|             | Frecuencia | %   | Frecuencia | %   | Frecuencia      | %   | Frecuencia | %   |
| Muy bajo    | 0          | 0   | 0          | 0   | 0               | 0   | 0          | 0   |
| Bajo        | 1          | 11  | 2          | 22  | 0               | 0   | 0          | 0   |
| Medio       | 0          | 0   | 1          | 11  | 5               | 56  | 0          | 0   |
| Alto        | 3          | 33  | 2          | 22  | 1               | 11  | 4          | 44  |
| Muy Alto    | 3          | 33  | 2          | 22  | 0               | 0   | 4          | 44  |
| No responde | 2          | 22  | 2          | 22  | 3               | 33  | 1          | 11  |
| Total       | 9          | 100 | 9          | 100 | 9               | 100 | 9          | 100 |

*Nota:* Elaboración propia.

Todos los encuestados creen que el impacto de la mayor fragmentación es alto o muy alto en la planta. Después le sigue el carguío.

**26. ¿Cuál es el nivel de restricción para el uso de mayores cantidades de explosivos en la fragmentación?**

Tabla 14. Resultados encuesta a proveedores pregunta 26.

| Criterio    | Geotécnia  |     | Acarreo    |     | Costo voladura |     |
|-------------|------------|-----|------------|-----|----------------|-----|
|             | Frecuencia | %   | Frecuencia | %   | Frecuencia     | %   |
| Muy bajo    | 0          | 0   | 0          | 0   | 0              | 0   |
| Bajo        | 1          | 14  | 2          | 29  | 0              | 0   |
| Medio       | 1          | 14  | 5          | 71  | 2              | 29  |
| Alto        | 0          | 0   | 0          | 0   | 4              | 57  |
| Muy Alto    | 5          | 71  | 0          | 0   | 1              | 14  |
| No responde | 0          | 0   | 0          | 0   | 0              | 0   |
| Total       | 7          | 100 | 7          | 100 | 7              | 100 |

*Nota:* Elaboración propia.

En el caso de los proveedores, la mayoría (5 encuestados) cree que la limitación geotécnica es la más relevante. En el segundo lugar está el costo de la voladura.

**27. En algunos casos de implementación del *Mine to Mill*, ¿han sido necesarias inversiones mayores? Por ejemplo: tipo perforadoras, camiones de mina, etc.**

Las respuestas obtenidas fueron:

- Sí (4 encuestados)
- No (5 encuestados)

**28. En su opinión, ¿cree Ud. que el Perú sea un buen mercado para la implementación de estrategias *Mine to Mill*?**

Respecto a la opinión si Perú sería un buen mercado para *Mine to Mill* se obtuvo lo siguiente:

- Medio (2 encuestados)
- Buen mercado (7 encuestados)

Los comentarios a esta pregunta fueron:

- a. Tiene minas de gran tonelaje y es el segundo productor de cobre del mundo
- b. En Perú la filosofía *Mine to Mill* está bien asentada en varias operaciones.
- c. Muchas operaciones trabajan con metodología tradicional y sus mejoras se basan en inversiones de capital. *Mine to Mill* les sería atractivo.
- d. Hay buenas oportunidades de aplicación de *Mine to Mill* pero los equipos de trabajo no son muy técnicos, lo cual hace difícil aprovechar estas oportunidades.
- e. Las empresas de gran volumen si bien las hay, son pocas aún.

**29. ¿Alguna vez el ahorro de energía que se ha logrado en algunas operaciones ha sido cuantificado en términos de huella de carbono? Esto por un tema ambiental.**

- Sí (5 encuestados)
- No (4 encuestados)

Los comentarios que hicieron:

- a. Todos los estudios donde se valoró como huella de carbono fueron realizados en Australia, donde se tiene incentivos económicos al respecto.
- b. En los que la respuesta fue negativa, se comentó que el tema de huella de carbono es un asunto de tinte más político.

**30. ¿Existen otras alternativas al *Mine to Mill*, por ejemplo, pre-chancado? Por favor comente.**

Respecto a la evaluación de las diferentes opciones a ser aplicadas en alternativa al *Mine to Mill*:

- Sí, el pre-chancado se evaluó en 8 de las 9 personas encuestadas.

Las principales ideas dadas por los encuestados fueron:

- a. El pre-chancado es solo usado cuando hay fallas de diseño en la capacidad del SAG.

- b. Es una muy buena opción, pero genera gastos de *Opex* y *Capex*. Lo mejor es agotar la capacidad instalada de la planta y luego pensar en ello.
- c. También se puede considerar junto con la mejora de la fragmentación.
- d. El pre-chancado es necesario cuando se requiere una expansión o eliminación de cuellos de botella.

De las respuestas dadas se concluye que el pre-chancado es una buena opción pero que involucra costos mayores de *Capex* por lo cual debe ser evaluado en una segunda etapa posterior al *Mine to Mill*.

**31. Cuando se realiza la evaluación del *Mine to Mill* ¿se cuantifican otros beneficios ocultos? tales como mejora en el acarreo, carguío, etc.**

- Sí (8 encuestados)
- No (1 encuestado)

Las principales opiniones son:

- a. Es parte normal del *Mine to Mill*.
- b. Solo se puede medir en empresas que tienen excelentes sistemas de información las cuales son pocas.
- c. Siempre se dan beneficios en el acarreo.
- d. A veces incluso la motivación del *Mine to Mill* es la mejora de la mina en el acarreo.

**32. Basado en su experiencia ¿cree usted que el *Mine to Mill* puede ser aplicado a todas las minas? ¿Sí o No? ¿Por qué?**

- Sí (6 encuestados)
- No (3 encuestados)

Las ideas principales dadas fueron:

- a. Como filosofía, siempre se debe aplicar.
- b. Siempre se tiene beneficio, la integración mina planta siempre lleva a mejoras por lo que siempre lleva a resultados positivos.
- c. Al menos se consigue un 10% en el aumento de tonelaje.
- d. Solamente se puede aplicar en minerales duros.

- e. Solamente se puede aplicar en operaciones que están lejos del óptimo. De lo contrario no se ve la ganancia en tonelaje.
- f. Se debe apuntar a eliminar el organigrama por departamentos separados.

**33. ¿Tiene algún comentario adicional que considere importante ser incluido en este estudio?**

Las recomendaciones adicionales que se recogieron de las encuestas fueron:

- a. El nombre *Mine to Mill* es un tema comercial, cada empresa debe darle la nomenclatura adecuada; por ejemplo: programa de integración mina planta.
- b. Se tiene ideas más desarrolladas tipo *Mine to Port*, *Mine to Tail*, y otras frases de marketing. La idea principal es integración lo cual lleva a optimización y es un concepto que debe ser más estudiado.
- c. Se debe considerar nuevas tecnologías en el *Mine to Mill*, por ejemplo, el *ore sorting*.

En algunos lugares de Australia se usa contratistas en mina. Los contratos deben incluir términos de *Mine to Mill*.