

Impacto de los gemelos digitales en la eficiencia y productividad de Minas Autónomas:

Caso Mina Quellaveco (Anglo American)

Autor: Felipe Carrillo - Anglo American Quellaveco, Avenida 25 de noviembre S/N, Fundo Rústico El Sauce, Charsagua; Moquegua, Perú, correo: felipe.carrillo@angloamerican.com; 968382844

Coautor 1: Juan Mansilla - ASTAY SYSTEMS, Avenida del pinar 152, Lima, Perú, correo: jmansilla@astaysystems.com, 940796910

RESUMEN

Este trabajo presenta la implementación y resultados de un **Gemelo Digital** en la operación minera autónoma de Quellaveco, utilizando la plataforma **DataTwin®**. El objetivo principal fue desarrollar una estrategia de minado selectivo asistida por esta tecnología para anticipar y gestionar la calidad del mineral alimentado a la planta, optimizando la recuperación metalúrgica y la productividad.

La metodología se centró en la integración de datos de múltiples sistemas (FMS, MinePlan, PI System), la creación de un modelo virtual del entorno operativo mediante **"bloques de minados"** (unidades de simulación realistas), y el uso de un motor de simulación para predecir el avance de la mina hora a hora.

El estudio de caso se enfocó en el control del **RSOL (cobre soluble)**, una variable crítica que impacta negativamente la recuperación. Se compararon dos escenarios:

Escenario tradicional: Un minado sin control explícito del RSOL, que ocasionó una alta variabilidad de este parámetro y una caída en la recuperación.

Escenario optimizado: Una secuencia de minado recomendado por el gemelo digital para controlar la mezcla de mineral y mantener estable el RSOL.

Los resultados demostraron que, aunque ambos escenarios procesaron el mismo tonelaje, el

enfoque optimizado por el gemelo digital redujo drásticamente la variabilidad de la recuperación (desviación estándar de **1.14** vs. 3.3 en el caso tradicional) y tiene el potencial de mantener el proceso de planta estable y predecible, lo que se traduce en una mayor recuperación real y una reducción de costos.

En conclusión, el proyecto demuestra el valor tangible del gemelo digital como una herramienta estratégica que permite pasar de una operación reactiva a una **gestión predictiva y proactiva**, mejorando la toma de decisiones en el Centro Integrado de Operaciones (CIO) y estableciendo un nuevo estándar para la minería 4.0.

1. Introducción

La industria minera global atraviesa una etapa de transformación estructural impulsada por desafíos técnicos, económicos, ambientales y sociales que obligan a repensar la forma en que se diseñan y gestionan las operaciones. Entre los principales retos destacan la caída progresiva de las leyes del mineral, el aumento en la complejidad de los cuerpos geológicos, los costos crecientes de operación, la presión por reducir el impacto ambiental y la necesidad de garantizar una operación segura y socialmente responsable. Frente a este escenario, las empresas mineras se ven obligadas a adoptar modelos de gestión más ágiles, basados en datos y tecnologías emergentes, como parte de la transición hacia una nueva era conocida como minería 4.0.

La minería 4.0 no se limita a la incorporación de sensores o automatización de equipos. Implica una transformación sistémica que busca conectar digitalmente todos los eslabones de la cadena de valor, desde el modelamiento geológico hasta la comercialización del concentrado, pasando por la planificación, perforación, voladura, carguío, acarreo, procesamiento, mantenimiento, entre otros procesos. Este nuevo enfoque requiere la implementación de arquitecturas digitales integradas, capaces de capturar, estructurar, procesar y analizar grandes volúmenes de datos heterogéneos en tiempo real, con el fin de mejorar la toma de decisiones en todos los niveles de la organización.



Ilustración 1: Blending en la chancadora

En este contexto, el concepto de gemelo digital (Digital Twin) ha emergido como una herramienta clave para habilitar esta transformación. Un gemelo digital se define como una representación virtual de activos, procesos o sistemas físicos que se actualiza continuamente a partir de datos operativos reales, permitiendo visualizar el estado actual, simular escenarios futuros y optimizar el rendimiento mediante inteligencia de negocios y modelos predictivos. Su aplicación en minería representa un avance significativo respecto a los tradicionales sistemas de monitoreo o control, ya que permite una comprensión holística y dinámica del sistema operativo, integrando fuentes de datos antes desconectadas.

El presente trabajo documenta la implementación de un gemelo digital en la mina de cobre a tajo abierto Quellaveco, operada por Anglo American en el sur del Perú. Esta operación constituye uno de los casos más avanzados de digitalización en la minería latinoamericana y mundial, destacando por la creación de un ecosistema tecnológico interconectado que abarca desde el campo hasta el Centro Integrado de Operaciones (CIO)

El gemelo digital DataTwin® consolida información proveniente de diversas plataformas clave, tanto de mina como de planta. Entre ellas se encuentran sistemas de gestión de flota (MineStar), perforación (Epiroc), planificación geotécnica y de producción (MinePlan), supervisión de procesos industriales (Honeywell), sistemas de control topográfico, y bases de datos de mantenimiento y monitoreo de condiciones. A través de esta integración, es posible visualizar en una sola interfaz el estado operativo de la mina en tiempo casi real, permitiendo no solo diagnósticos instantáneos, sino también simulaciones basadas en datos históricos, modelamiento geoespacial, análisis de KPIs operativos, y generación de alertas para la mejora continua.

Una característica distintiva de esta implementación es su integración con el Centro Integrado de Operaciones (CIO), lo que habilita una visión centralizada, colaborativa y basada en datos del conjunto de procesos que conforman la operación. Esta capacidad de generar una representación digital de alto detalle de los procesos físicos permitirá a Quellaveco trabajar con modelos predictivos.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

- Generar estrategias de minado asistidas por un gemelo digital para anticipar y gestionar la calidad del material alimentado a planta, asegurando la continuidad operativa, la productividad y la recuperación metalúrgica, en el marco de una gestión innovadora y basada en datos.

2.2. Objetivos específicos

- Optimizar la estrategia de minado mediante el uso de un gemelo digital, integrando variables geometalúrgicas y operativas para alinear la secuencia de extracción con los requerimientos dinámicos de planta.
- Anticipar y controlar la calidad del material enviado, ha chancado, identificando zonas con presencia RSOL u otros materiales que afectan la recuperación metalúrgica y la eficiencia del procesamiento.
- Rediseñar la lógica de asignación de equipos y frentes de minado, priorizando aquellas zonas que aseguren estabilidad en la ley, características del mineral y alimentación a chancado, con base en su impacto sobre la alimentación a planta.

3. Compilación de Datos y Desarrollo del Trabajo

La implementación del Gemelo Digital en la mina Quellaveco siguió una secuencia estructurada de fases orientadas a garantizar la integración tecnológica, la operatividad en campo y la generación de valor.

3.1. Recopilación e integración de datos

Se integraron múltiples fuentes de datos relevantes para el análisis de la estrategia de minado y su impacto sobre la recuperación metalúrgica. Las variables clave consideradas fueron:

- Modelo de bloques (leyes, contaminantes, recuperación)
- Polígonos de minado (Ubicación)
- Ciclos de acarreo (origen–destino, tiempos, leyes, toneladas)

La información fue consolidada en el gemelo digital, integrando datos estructurados desde sistemas fuente como planeamiento, flota, geología y planta, asegurando su trazabilidad y consistencia espacial.

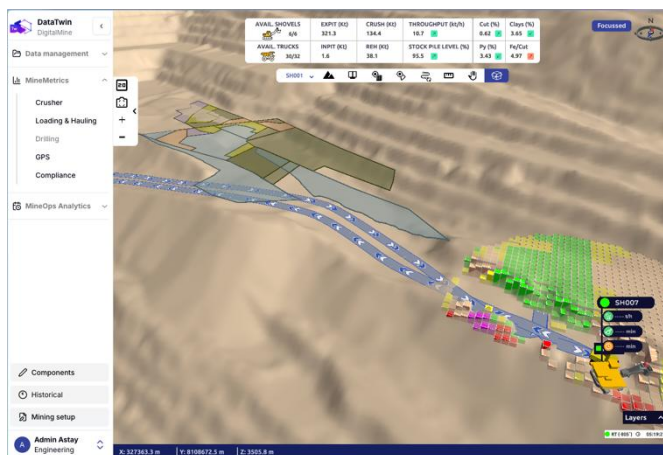


Ilustración 2: Minado por bloques y polígonos

3.2. Etapa de análisis y evaluación del enfoque tradicional

En esta etapa, se analizó el desempeño del enfoque tradicional de secuenciamiento de minado aplicado en el área evaluada. Este enfoque se caracteriza por priorizar el avance lineal del frente de minado, condiciones operativas y el cumplimiento de metas de tonelaje hacia planta, sin una evaluación detallada de la composición geometalúrgica del material ni de su efecto sobre la eficiencia metalúrgica.

Bajo esta lógica, la asignación de equipos de carguío y acarreo no considera variables como la presencia de arcillas, el contenido de cobre soluble (RSOL) o el comportamiento histórico de recuperación asociado a ciertos dominios geológicos. El material es despachado con base en disponibilidad operacional y metas de producción,

generando una posible variabilidad no controlada en la alimentación a planta.

Para evaluar este enfoque, se recurrió a visualizaciones desarrolladas en el entorno del gemelo, integrando información del modelo de bloques, polígonos de minados, datos de carguío real, y recuperación efectiva.

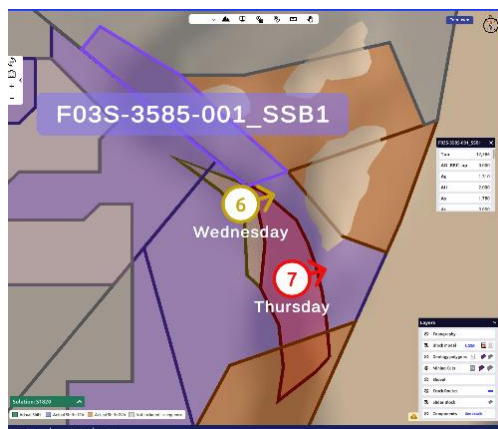


Ilustración 3: Plataforma del gemelo

Estas visualizaciones permitieron identificar desviaciones entre lo ejecutado y la estrategia de minado asistida por el gemelo, así como su impacto en los KPIs metalúrgicos.

Los principales elementos analizados fueron:

- La distribución geoespacial de elementos críticos como arcillas y RSOL, en relación con el material efectivamente cargado.
- La correlación entre los polígonos minados y la recuperación metalúrgica registrada, identificando patrones de pérdida de eficiencia asociados a ciertas zonas o decisiones operativas.

Este análisis permitió establecer una línea base sobre la cual comparar el impacto del enfoque propuesto, basado en la utilización táctica del gemelo digital para optimizar la secuencia y calidad del minado.

La representación de los 2 polígonos de minado junto con su secuencia de minado actual se aprecia en la Ilustración 4.

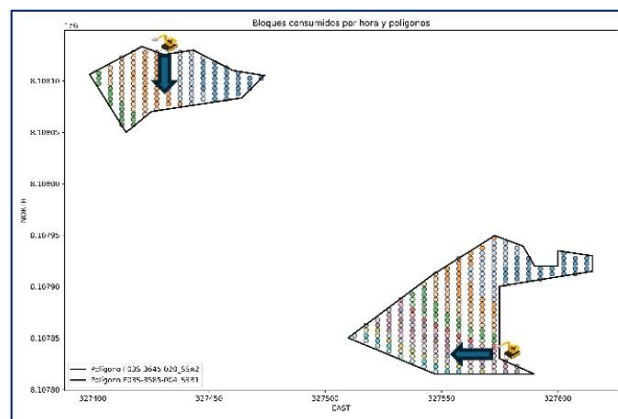


Ilustración 4: Minado tradicional de los polígonos

3.3. Diseño e implementación de una estrategia de minado selectivo asistida por gemelo digital

Posterior al análisis del enfoque tradicional, se diseñó una estrategia de minado selectivo basada en el uso del gemelo digital como herramienta de integración, simulación y soporte táctico para la toma de decisiones operativas. Esta etapa tuvo como objetivo anticipar el impacto geometalúrgico del mineral sobre la recuperación en planta y, en función de ello, reconfigurar el secuenciamiento de minado para optimizar los resultados metalúrgicos sin comprometer la continuidad operacional.

El gemelo digital permitió operar con una representación virtual y dinámica del sistema mina-planta, facilitando la incorporación de variables geológicas, metalúrgicas y operativas en un entorno tridimensional interactivo. Esto hizo posible pasar de una lógica de producción centrada en tonelaje a una gestión basada en calidad y aporte metalúrgico del mineral.

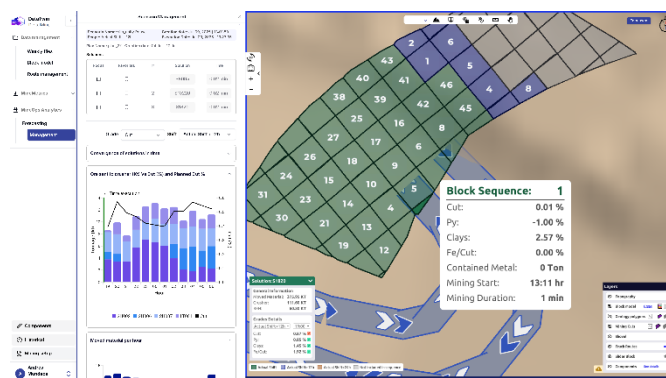


Ilustración 5: Representación virtual del gemelo digital

La solución incluyó los siguientes elementos clave:

- Uso del modelo de bloques enriquecido con variables geometalúrgicas relevantes, tales como ley de cobre, RSOL, presencia de contaminantes como arcillas y factores de recuperación estimados por dominio geológico.
- Reestructuración del orden de minado de polígonos, priorizando zonas con mejor comportamiento proyectado en planta, y minimizando el envío de material con alto riesgo de afectar la recuperación.
- Evaluación de escenarios simulados mediante el gemelo digital, integrando datos históricos de planta, trayectorias de carguío y distribución de mineral para estimar el rendimiento global ante diferentes combinaciones de origen.
- Introducción de restricciones operativas dinámicas, tales como la priorización o exclusión de rutas de acarreo hacia ciertos destinos, capacidad de procesamiento de chancado, tiempos muertos de los equipos y restricciones del tipo de material que acepta chancadora, en función de las condiciones de blending, tolerancia de planta y disponibilidad de equipos.

Esta estrategia fue validada en un periodo de una semana, utilizando datos reales de producción y recuperación, permitiendo comparar el desempeño del enfoque tradicional con la propuesta asistida por el gemelo digital. La representación de los 2 polígonos con la secuencia de minado propuesto se aprecia en la Ilustración 6.

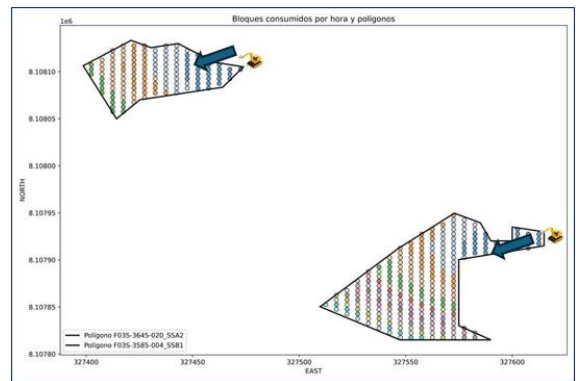


Ilustración 6: Minado selectivo propuesto

3.4. Metodología de simulación y evaluación de escenarios

Esta metodología describe cómo el gemelo digital recibe datos, define bloques de minado y simula diferentes secuencias de minado según parámetros operativos críticos como RSOL. La bifurcación en dos escenarios permite evaluar su impacto en recuperación y estabilidad de planta, facilitando una toma de decisiones informada desde el Centro Integrado de Operaciones (CIO).



Ilustración 7: Funcionamiento del Gemelo en el IOC

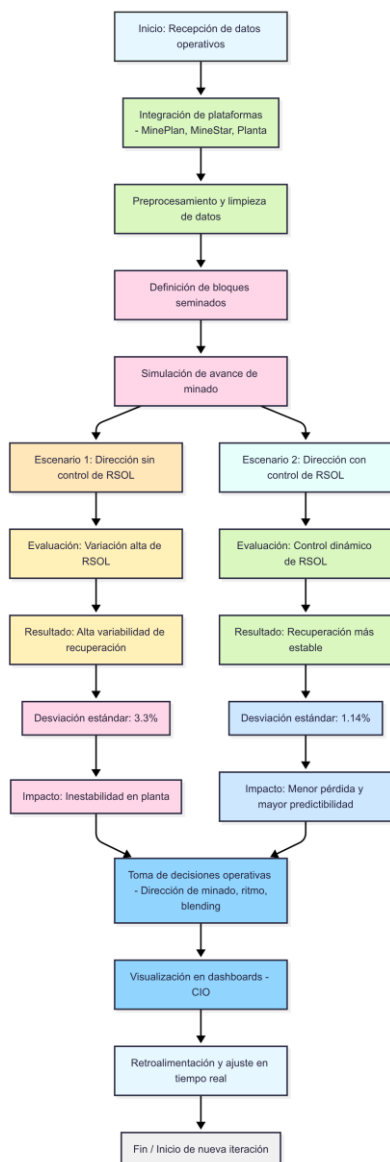


Ilustración 8: Metodología

4. Presentación y discusión de resultados

Como se aprecia en las Ilustración 4 e Ilustración 6, han generado dos escenarios de secuencia de minado utilizando bloques minados y simulación de dirección operativamente viable. Ambos casos consideran una misma velocidad de minado (6,000 toneladas por hora) y una duración total de 10 horas, bajo supuestos idénticos de disponibilidad y mantenimiento.

- **Escenario 1:** dirección de minado sin control explícito de RSOL (Ver Ilustración 9).
- **Escenario 2:** dirección de minado adaptada con estrategia de blending para controlar RSOL (Ver Ilustración 10).

En ambos escenarios, los polígonos fueron completamente minados y enviados a chancado dentro del plazo establecido. Sin embargo, los resultados muestran diferencias significativas en términos de comportamiento operativo:

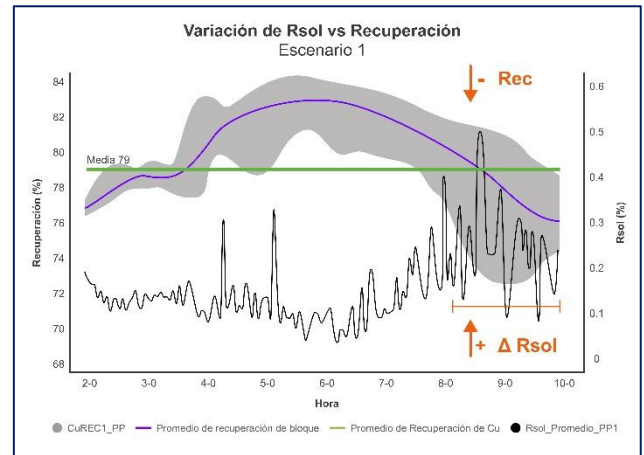


Ilustración 9: Escenario 1

Se observa un incremento progresivo del parámetro RSOL en el transcurso del minado, lo que se traduce en una disminución sostenida de la recuperación metalúrgica promedio y una alta variabilidad en dicha recuperación. Esta condición representa un riesgo operativo en planta, donde la inestabilidad afecta directamente la eficiencia y los costos de tratamiento.

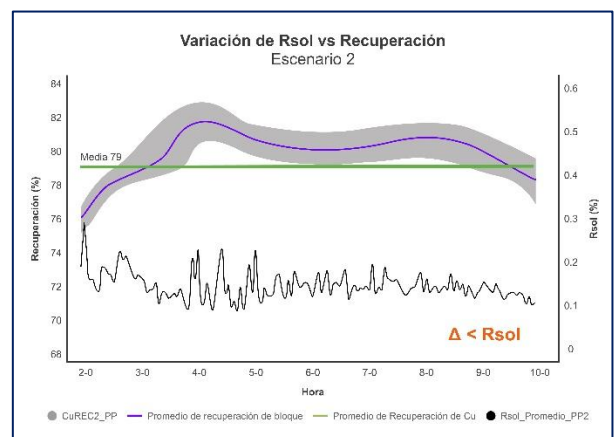


Ilustración 10: Escenario 2

La variación de RSOL es considerablemente menor. El control sobre esta variable permitió mantener una recuperación más estable, cercana a la media objetivo de 79%, reduciendo significativamente la desviación estándar y, por ende, los impactos negativos en planta.

En ambos escenarios, la recuperación media fue similar, pero las desviaciones estándar marcaron la diferencia: en el Escenario 1 se registró una desviación de 3.3% (con media 76.11%), mientras que en el Escenario 2 fue de solo 1.14% (con media 78.16%). Esta diferencia es crítica desde el punto de vista de estabilidad operacional y control metalúrgico. La discusión de resultados evidencia que el gemelo digital permite:

- Simular secuencias de minado realistas que optimicen variables metalúrgicas críticas.
- Anticipar desviaciones antes de que ocurran en planta.
- Decidir cambios en la dirección o velocidad del minado sin comprometer el tonelaje.

5. Conclusiones

- La implementación del gemelo digital en Quellaveco demuestra que es posible anticipar el comportamiento del minado y sus impactos metalúrgicos en planta, en función de variables clave como RSOL.
- Simulaciones basadas en bloques de minados, permiten tomar decisiones operativas más cercanas a la realidad, evitando soluciones teóricas poco prácticas.
- Minimizar la variabilidad en la recuperación es un objetivo alcanzable mediante estrategias de minado inteligentes, soportadas por el gemelo digital.
- La estabilidad operativa lograda se traduce en mejores márgenes, menor consumo de insumos y cumplimiento de metas productivas.

5.1. Resultados operacionales y beneficios

- Coordinación efectiva entre equipos y procesos.
- Mayor cumplimiento del plan semanal y mensual.

- Detección temprana de desvíos (mantenimiento, demoras y eventos).
- Reducción de variabilidad en el rendimiento.
- Apoyo a decisiones en blending, mantenimiento, dispatch.
- Control dinámico de contaminantes como RSOL, arcillas u otros.

7. Referencias bibliográficas

- Asad, M. W. A., & Topal, E. (2011). A review of simulation based optimization of open pit mine production scheduling. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, *111*(11), 753–763.
- El Bazi, N., El Hadraoui, H., Laayati, O., El Maghraoui, A., Chebak, A., & Mabrouki, M. (2023, julio). Digital twin in mining industry: A study on automation commissioning efficiency and safety implementation of a stacker machine in an open-pit mine. En *2023 5th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)* (pp. 238-243). IEEE.
[<https://doi.org/10.1109/GPECOM58473.2023.10222165>](<https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1109/GPECOM58473.2023.10222165>)
- Souza, M. J. F., de Lima, T. M., & Coelho, I. M. (2010). A model for the production scheduling of an open pit mine with multiple destinations and blending requirements. *Minerals Engineering*, *23*(14), 1163–1171.
[<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.07.012>](<https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.07.012>)
- Moradi Afrapoli, A., & Askari-Nasab, H. (2019). A multi-stage stochastic optimization model for open-pit mine production scheduling under geological uncertainty. *International Journal of Mining Science and Technology*, *29*(1), 113–122.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.06.002>

AUTORIZACIÓN DE PARTICIPACIÓN

Yo Felipe Carrillo, superintendente de autonomía de Anglo American Quellaveco; autorizo que el trabajo titulado “Impacto de los gemelos digitales en la eficiencia y productividad de Minas Autónomas: Caso Mina Quellaveco” presentado por el autor Felipe Carrillo y coautores Juan Mansilla, sea presentado en el concurso del Premio Nacional de Minería del evento PERUMIN 37 Convención Minera en las fechas del 22 al 26 de setiembre del 2025 en la ciudad de Arequipa.

Firma

DNI/Pasaporte

Fecha

Nota:

Esta autorización se entrega solo en el caso de que el participante se presente de manera independiente y el trabajo implique el desarrollo en el marco de una empresa o institución. La indicada autorización deberá ser entregada en hoja membretada.