

DESARROLLADA EN CHILE:

Alto impacto

genera investigación que propone nuevo paradigma en la gestión de la incertidumbre geológica

Con participación de la industria y la academia, el trabajo plantea una nueva forma de entender esta variable en el rubro de la minería, con aplicaciones directas a proyectos de clase mundial.

En agosto de 2025, la revista *Minerals* publicó el artículo *"A Stochastic Framework for Mineral Resource Uncertainty Quantification and Management at Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi"*, desarrollado por los académicos del Departamento de Ingeniería de Minas de la Universidad de Chile, Alejandro Cáceres Saavedra y Xavier Emery, junto a la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi y la empresa Geolnova, de la cual Cáceres es co-fundador y gerente de I+D hace 15 años.

El impacto fue inmediato: más de 15.000 descargas en sus primeros días, en primera posición de acceso desde el 2023, generando una discusión global entre especialistas en geociencias, planificación minera y finanzas. ¿La razón? El trabajo propone una nueva forma de entender y gestionar la incertidumbre geológica en minería, con aplicaciones directas a proyectos de clase mundial.

Cáceres indica que prefirió desarrollar esta investigación en su calidad de estudiante del Doctorado en Ingeniería de Minas de la Universidad de Chile, en lugar que otras escuelas de minas del mundo, por la apertura del programa a nuevas ideas y la posibilidad de trabajar junto a un equipo de investigación de clase mundial. Esa combinación de rigor académico, interdisciplinariedad y cercanía con la industria le permitió conectar su experiencia profesional con una plataforma científica capaz de proyectar metodologías de frontera para la minería.

El desafío: La brecha entre lo prometido y lo producido

Uno de los problemas más persistentes de la minería es la brecha sistemática entre lo planificado y lo realmente producido. Costos más altos, retrasos en la ejecución y menores leyes de cabeza son síntomas de una misma causa: la incertidumbre geológica no gestionada.

El artículo subraya que la industria ha usado metodologías determinísticas —modelos de bloques únicos y clasificación de confianza basada en distancias a sondajes— que rara vez comunican de manera explícita la magnitud del riesgo. Esto genera falsas certezas y expectativas sobredimensionadas, tanto para inversionistas como para los propios operadores.

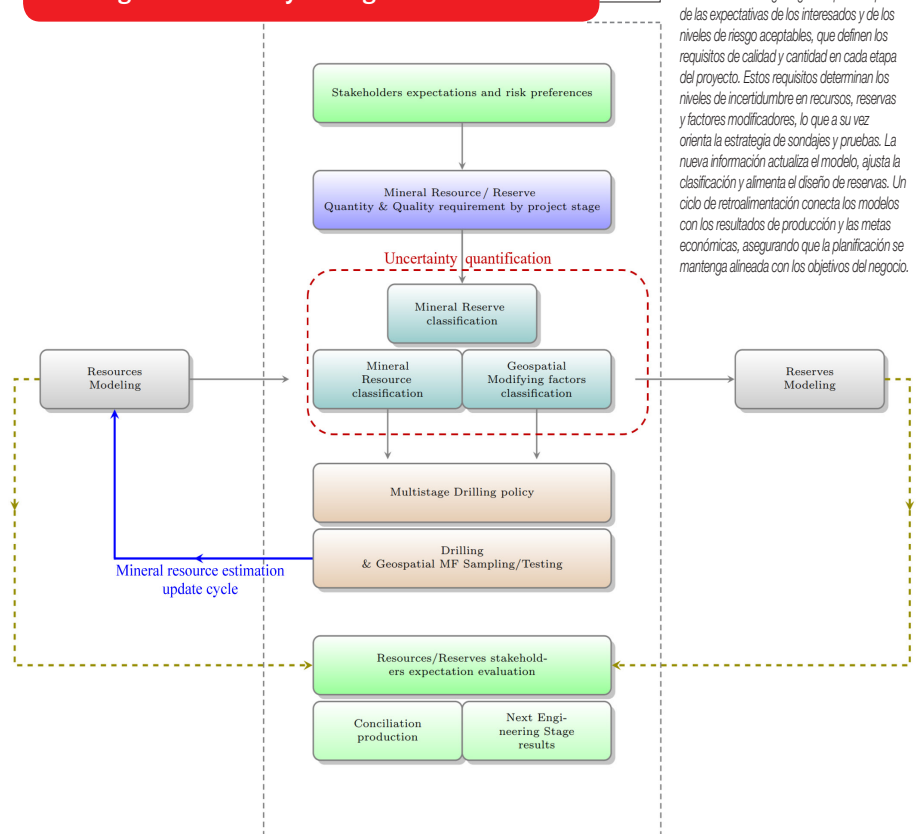
El aporte metodológico: De la geología a las finanzas

El trabajo presentado integra simulaciones geoestadísticas para cuantificar tanto la incertidumbre espacial (en geología y leyes) como su propagación temporal en los flujos de caja asociados a un plan minero. Uno de los hallazgos centrales es que las correlaciones espaciales de la geología y de los factores modificadores para convertir recursos minerales en reservas minerales se traducen en correlaciones temporales de los flujos de caja. Dicho de otro modo: las incertidumbres geológicas viajan a través del plan minero y generan incertidumbre en los ingresos futuros.

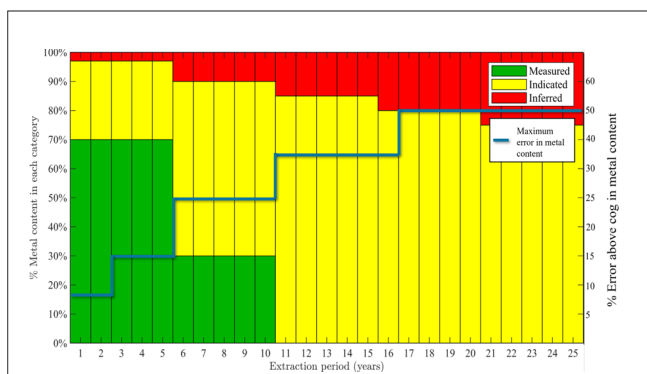
La perforación como inversión estratégica

La práctica habitual en minería ha sido perforar para cumplir proporciones de recursos medidos o indicados, de acuerdo con guías corporativas o códigos de reporte y básicamente como un costo. La investigación desarrollada cambia el enfoque: propone ver la perforación como una inversión estratégica de reducción de riesgo y a la altura de la planificación minera. Mediante algoritmos de optimización se identifican qué áreas del depósito entregan la mayor reducción de incertidumbre en el VAN por cada metro perforado, asegurando una mayor estabilidad financiera del proyecto. Los resultados son contundentes: con una menor inversión de sondajes

Geological Uncertainty Management Framework

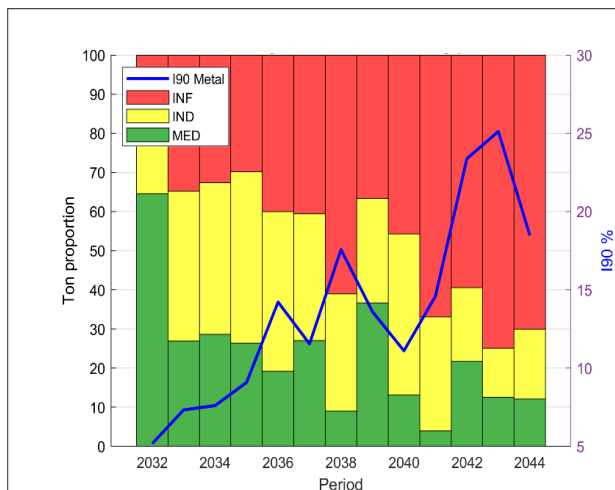


Resource Sustainability Matrix - Quantity and Quality profile



Formato propuesto de matriz de sustentabilidad. Para cada etapa del proyecto, establece la proporción de categorías de confianza requeridas y el nivel máximo de incertidumbre anual, por ejemplo, en el contenido metálico. Al mostrar la composición total de incertidumbre por año, la matriz convierte la reducción de la incertidumbre en un objetivo explícito del desarrollo del proyecto.

Sustainability Matrix and I90 Metal by period



Matriz de sustentabilidad aplicada a un plan minero, que muestra la proporción de cada categoría de recursos y la incertidumbre anual según el nivel de información proveniente de los sondeos existentes. Permite visualizar la incertidumbre actual y evaluar las medidas de mitigación y su impacto en el proyecto.

se logra una mayor reducción de riesgo que con diseños de mallas regulares tradicionales.

La incertidumbre: De lo local al reporte de recursos minerales

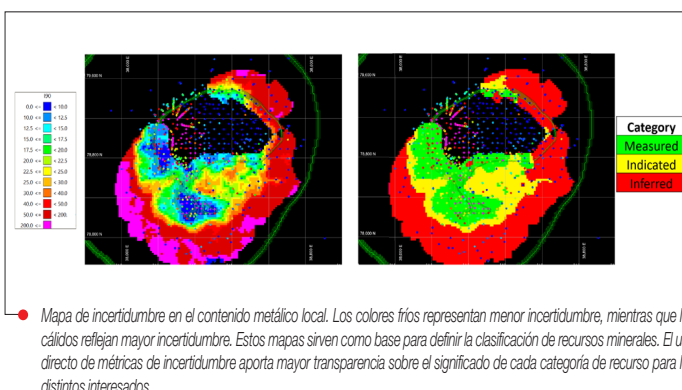
El trabajo introduce métricas locales de incertidumbre usando escenarios simulados del yacimiento mineral, para directamente clasificar los recursos minerales en medidos, indicados e inferidos, de modo de facilitar la comunicación y entendimiento de la significancia de los mismos. Adicionalmente, retoma la idea de la matriz de sustentabilidad desarrollada en Codelco en el 2004, pero agregando una dimensión del nivel de incertidumbre en el plan minero en variables relevantes como el metal contenido. En esencia, presenta la cantidad de recursos de alta

confianza y la calidad de dicha confianza con métricas objetivas sobre la incertidumbre asociada por año en el plan minero.

Esto transforma la clasificación en una herramienta de comunicación estratégica para directores, bancos e inversionistas, que ahora pueden ver claramente cuánto riesgo hay y qué tan gestionado está.

Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi: Liderando la gestión de la incertidumbre geológica.

Lo más relevante es que esta investigación no se queda en la teoría. Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi impulsó bajo el liderazgo de Andrés Pérez, Gerente Recursos Mineros y Desarrollo, junto a un equipo que integra geología,



Mapa de incertidumbre en el contenido metálico local. Los colores fríos representan menor incertidumbre, mientras que los cálidos reflejan mayor incertidumbre. Estos mapas sirven como base para definir la clasificación de recursos minerales. El uso directo de métricas de incertidumbre aporta mayor transparencia sobre el significado de cada categoría de recurso para los distintos interesados.

planificación minera y geotecnia, con una visión más integrada del negocio, el desarrollo e implementación de la aproximación en sus mega-depósitos. Los resultados ya incluyen:

- Simulaciones geoestadísticas completas de geología y leyes
- Campañas de perforación optimizadas
- Clasificación soportada en métricas de incertidumbre
- Integración regular en sus ciclos de modelamiento

Jorge Pérez, Superintendente Recursos Mineros, y Felipe Ibarra, Geólogo Senior Recursos y QP de CMDIC, señalan que la posibilidad de desarrollo se dio por la visión de Collahuasi en su política de gestión de riesgos, las altas competencias técnicas de sus equipos, ejecutivos mineros con formación avanzada tanto técnica como en gestión de negocios, junto al aporte de académicos y empresas especializadas para materializar el proceso.

Los autores destacan que estas ideas surgen en un contexto único: en los últimos 25 años la región ha elevado su nivel educacional, consolidando programas de excelencia, exportando académicos a universidades de Reino Unido, Canadá y Australia, y formando profesionales que hoy ocupan posiciones técnicas y ejecutivas en compañías de clase mundial. Cáceres subraya la tradición minera y la instauración de prácticas de primer nivel en la región, apoyadas en los aportes de referentes como Edmundo Tulcanaza, Pedro Carrasco Castelli, Diniz Ribeiro, Eduardo Contreras M., Alfredo Marín y Marco

Alfaro, sobre los cuales se construyen hoy nuevas metodologías. Con este trasfondo —sumado a la riqueza geológica excepcional de la región— resulta claro que Chile, Brasil y Perú lideran varios de los avances más relevantes de la minería mundial.

Implicancias para la minería global

El artículo plantea un cambio cultural: de la cantidad a la calidad, de la geometría a la incertidumbre explícita, de la perforación como gasto a la perforación como inversión de valor.

Sus autores señalan que esta propuesta puede convertirse en la base de nuevas prácticas para el desarrollo más eficiente del negocio minero, y eventualmente en un nuevo estándar internacional. Gonzalo Fuster, QP de CMDIC y miembro del directorio de la Comisión Calificadora de Competencias en Recursos y Reservas Mineras, enfatiza que este trabajo se anticipa a la evolución necesaria de los códigos de reporte y a las crecientes exigencias de los mercados financieros, gatillando en el largo plazo una minería más sustentable y con menor riesgo para los inversionistas.

Como bien resumen: "La incertidumbre no desaparece, se gestiona". Y hacerlo de manera transparente es la única vía para que la minería cumpla sus promesas de valor.

El artículo es de libre acceso y puede leerse en el enlace de la revista Minerals: <https://www.mdpi.com/2075-163X/15/8/855>. mch