

SIMULACIONES CONDICIONALES GEOESTADÍSTICAS APLICADA A LA CLASIFICACIÓN DE RECURSOS

Mario E. Rossi
GeoSystems International
479 Cascadita Terrace
Milpitas, CA, 95035
USA
(1-408) 956-1395
mrossi@geosysint.com

Jorge Camacho V.
Minera Michilla S.A.
Sucre 220, Of. 606
Antofagasta
Chile
(56-55) 627-521
icamacho@michilla.cl

Resumen

Las simulaciones condicionales geoestadísticas se han popularizando como herramientas prácticas que proveen modelos de incertidumbre para diferentes etapas de un proyecto minero. Han sido utilizadas como herramientas de control de leyes en operaciones diarias, para evaluar la incertidumbre y el riesgo de las reservas mineras en estudios de factibilidad, y para evaluar el potencial de mineralización en ciertos ambientes geológicos. Otras aplicaciones incluyen evaluación de recursos y reservas recuperables (dilución), clasificación de recursos y reservas, y optimización de espaciamiento de sondajes.

Todas las aplicaciones a escala industrial de las simulaciones condicionales pretenden aprovechar una caracterización “correcta” o “precisa” de la incertidumbre, describiendo adecuadamente la variabilidad observadas a partir de los datos geológicos y su impacto en las predicciones finales. Este trabajo presenta una serie de temas relevantes a los esquemas de Clasificación de Recursos y Reservas habitualmente utilizados en la industria, basado en el modelo de incertidumbre que las simulaciones condicionales proveen. De mayor interés aún, se analiza el riesgo que este modelo de incertidumbre implica para sub-regiones (unidades) de extracción del yacimiento, por ejemplo definidas por fases de extracción mineras o períodos de tiempo. Este riesgo se representa por medio de intervalos probabilísticos, analizando la consecuencia de los posibles márgenes de error. Este concepto es aplicable tanto a minería de cielo abierto como subterránea.

La aplicación descrita en este trabajo se ha tomado de una mina de Cu de tamaño medio en el norte de Chile, con operaciones a cielo abierto y subterráneo. Se demuestra el impacto de algunas de las variables geológicas en los modelos de simulación resultante, y los intervalos de confianza derivados de ellos. También se comparan estos intervalos probabilísticas con un esquema más “tradicional” de clasificación de recursos, y la amplia

diferencia que resulta en la confiabilidad de las estimaciones para las distintas unidades de extracción.

1.0 Introducción

Antecedentes y Requisitos

Las simulaciones condicionales es un grupo de herramientas geoestadísticas que fueron desarrolladas para evaluar la incertidumbre de una estimación, proveyendo así una visión alternativa de un yacimiento minero. Existen varias versiones de simulaciones, basadas en distintas suposiciones y modelos probabilísticos. Se pueden agrupar en simulaciones paramétricas, basadas en la teoría Gaussiana, y simulaciones no paramétricas, para las cuales no se supone ningún modelo probabilístico. La geoestadística no paramétrica fue desarrollada a principios y mediados de los '80, desarrollándose entre otras la técnica de Simulación de Indicadores Secuencial, aplicada en este trabajo.

La implementación de una simulación condicional es relativamente compleja, particularmente si la técnica se aplica a yacimientos donde no existe experiencia previa con modelamiento geoestadístico. Se requieren una serie de estudios estadísticos y geoestadísticos antes de implementar las simulaciones, tal como ocurre con las estimaciones de recursos con técnicas geoestadísticas. Entre otros, y dependiendo de la técnica utilizada, se requiere un análisis estadístico detallado, incorporación de los controles geológicos relevantes, estudios de variografía, etc. La cantidad, forma e implementación de estos estudios previos depende en gran medida del yacimiento y de las técnica de simulación que se prevee emplear. Si existe un modelo de recursos previo, estimado con técnicas geoestadísticas, una buena parte de los análisis estadísticos ya habrán sido completados, y la tarea de implementar una simulación se simplifica significativamente.

Se pueden simular leyes de minerales, variables o características geológicas, y esencialmente cualquier aspecto de un yacimiento que impacte su flujo de caja (y Valor Presente Neto) real o predicho. En la mayoría de los casos, la motivación para implementar simulaciones condicionales aparece porque existen dudas, problemas, o preguntas sin clara respuesta, derivadas de datos y estudios previos. Estas preguntas o dudas aparecen generalmente cuando se tienen conciencia de que cualquier estimación de los recursos (toneladas y ley), de cualquier tipo y de cualquier yacimiento, está sujeta a errores. La pregunta lógica subsiguiente es "cuán grande puede ser mi error?". En general, esta pregunta es válida para la estimación de cualquier factor que afecte el Valor Presente Neto y Flujo de Caja del negocio minero, que es en definitiva la motivación inicial de estos trabajos.

Dentro de las variables más importantes que afectan las predicciones del flujo de caja está la cantidad (toneladas), calidad (ley, y otras variables de importancia metalúrgicas), y ubicación espacial de los recursos minerales a extraer.

A su vez, dentro de este grupo, la obtención de un modelo geológico que describa adecuadamente los distintos controles de mineralización (y por ende su distribución espacial) es sin dudas la más importante de todas las tareas previas necesarias para obtener un modelo de simulaciones. Luego de identificar los aspectos de la geología que controlan la distribución espacial de la mineralización, se obtiene generalmente una representación del modelo geológico con polígonos en sección cruzada primero y refinados luego en planta, u ocasionalmente refinados en sección longitudinal, o ambos. Donde no existen factores geológicos evidentes de control de ley, generalmente se interpreta una isoley en las zonas donde se prevee pueda existir mineralización. Este modelo es denominado aquí “determinístico”, dado que los polígonos y los volúmenes que resultan de ellos no tienen margen de error. Las unidades geológicas, isoleyes, etc. tienen los límites exactos que el geólogo interpretó. Esta es una fuente de error considerable, típicamente ignorada en los cálculos de recursos. Además, el modelo geológico así obtenido generalmente es el factor principal que determina las toneladas mineralizadas en el yacimiento.

Este modelo geológico probablemente será el mismo (o muy similar) al incorporado en la estimación de recursos previas del yacimiento. Existe la posibilidad de simular ciertos aspectos de la geología, para condicionar el modelo de simulaciones con un modelo geológico probabilístico, en vez de la interpretación por medio de polígonos en secciones o plantas (modelo determinístico).

Estimación o Simulación?

Para estimar los recursos de un yacimiento, habitualmente la mineralización se representa por medio de una malla de bloques en tres dimensiones, estimándose la ley de cada a partir de los sondajes de exploración disponibles. Si se utiliza alguna forma de kriging en la estimación, se obtiene previamente un modelo de continuidad espacial a partir de los mismo sondajes, el cual se incorpora en el algoritmo de estimación. Los recursos estimados de esta manera tienen dos características importantes:

- No incorporan una medida del error (ver discusión acerca de la varianza de estimación más abajo).
- No reproducen las estadísticas básicas de los datos de partida. En particular, el histograma y el modelo de continuidad espacial. A lo sumo, si la técnica es aplicada correctamente, se puede asegurar que, en promedio, los valores estimados promedios serán similares a los valores verdaderos (y desconocidos).

En el caso de las simulaciones, el modelo resultante reproduce los valores del histograma, y también reproduce el modelo de variograma incorporado. Debido a esto, los recursos que resulten reflejarán mejor *la variabilidad de la mineralización*, sin el efecto de suavización característico del kriging.

Por lo tanto, la simulación y la estimación son dos técnicas diferentes que se complementan entre sí. La simulación permite reproducir mejor la variabilidad del yacimiento, por lo que resultará en mejores soluciones para aquellos problemas donde la variabilidad (de leyes, por ejemplo) es el aspecto más importante. Por ejemplo, en el control de leyes de la operación, planificación a corto plazo, intervalos de confianza para estimaciones de recursos, globales o locales, dilución, análisis de riesgo y sensibilidad, etc.

Objetivos de este Trabajo

La motivación principal de este trabajo es un mejor entendimiento del significado de la clasificación de recursos utilizada habitualmente en la industria. Para ello se obtuvo un modelo de simulaciones condicionales para el yacimiento cuprífero Lince-Estefanía, de Minera Michilla S.A., ubicado en la cordillera de la costa, unos 100km al norte de Antofagasta, Chile.

Los estándares de clasificación de recursos más aceptados mundialmente están basados en los criterios propuestos por varias instituciones mineras, incluyendo el Comité Conjunto de Reservas Minerales (JORC) del Instituto australiano (AusIMM), los criterios de la Sociedad de Ingenieros de Minas de EEUU (SME), y, más recientemente, un grupo de trabajo canadiense del Instituto de Ingeniería (CIM), etc. Todos estos sistemas de clasificación apuntan a resolver un problema extremadamente complejo, al intentar reflejar por medio de categorías (medidos-indicados-inferidos, por ejemplo) la confiabilidad de distintos tipos de mineralización, de yacimientos, y de nivel de conocimiento geológico según la etapa de desarrollo del proyecto minero.

Los niveles gerenciales de las compañías mineras requieren de una metodología sencilla y práctica para asesorar y entender los niveles de riesgos implícitos en una estimación de recursos, el plan minero que se deriva, y en definitiva el flujo de caja proyectado. Los estándares internacionales mencionados no cumplen con esta necesidad. Por ejemplo, el clasificar el 50% de los recursos de un yacimiento como "medidos" no indica, por sí mismo, si se prevén errores de estimación, y de que magnitud. Solamente indica que se conocen los recursos a un nivel de certeza suficiente como para esperar, que, en promedio, las predicciones de toneladas y leyes se hagan realidad. Esto lleva a generar una expectativa de exactitud en estas predicciones, que generalmente son falsas. Mucho más útil es poder evaluar, dentro de la categoría "medidos", cual es el nivel de confiabilidad de los recursos (toneladas y ley). Por ejemplo, si en cierto sector para los recursos medidos (reservas probadas) se espera una extracción de $\pm 10\%$; es posible que en otro sector

“medido”, la variación esperada esté dentro de $\pm 15\%$; este tipo de información es el que se obtiene con un modelo de simulación condicional.

2.0 Breve Descripción de Simulaciones Condicionales Geoestadísticas

Para una descripción más detallada y teórica de las simulaciones geoestadísticas, el lector es referido a Goovaerts (1997) o Journel (1978).

El propósito es construir un modelo que reproduce el histograma completo y el modelo de variograma de los datos originales (sondajes y hoyos de tronadura). También se debe incluir todos aquellos que se consideren importantes de la geología, esto es, los controles de mineralización más importantes. Todas las simulaciones condicionales se construyen típicamente en mallas finas (simulando nodos en mallas de entre 1x1x1m a 5x5x5m – como en el ejemplo presentado aquí), tan finas como permita la herramienta computacional utilizada.

Al reproducir el histograma, el modelo representa correctamente la proporción de valores altos y bajos de las leyes, la media, varianza, y otras características estadísticas de los datos de partida. Al reproducir el modelo de variograma, describe correctamente la complejidad espacial del yacimiento y la conectividad entre los distintos rangos de leyes. Con esto se logra modelar aspectos fundamentales de los recursos, que impactan significativamente en el diseño y planificación de las distintas fases de extracción del proyecto. Se requieren múltiples modelos de simulación para obtener un modelo de incertidumbre, la base del análisis de riesgo subsiguiente.

Los datos de los sondajes que se utilizan para condicionar la simulación tienen que pertenecer a la misma población. Cambios en los controles de mineralización requiere la separación de los datos originales en distintas poblaciones, tal como cuando ocurren límites de mineralización, litológicos, cambios estructurales, etc. También se debe tener un entendimiento cabal del comportamiento de las altas leyes, a menudo contribuidores significativos a los recursos estimados globales.

El método de simulación a ser utilizado debe ser decidido en base a la geología y características del yacimiento a ser simulado. La decisión primera es si utilizar un método paramétrico, como por ejemplo la Simulación Secuencial Gaussiana (Isaaks, 1990), o no paramétrico, como la Simulación Secuencial de Indicadores (Alabert, 1987).

La simulación de indicadores es más complicada, y está basada en técnicas de krigeage de indicadores múltiples (Journel, 1988). La primera es más sencilla y más rápida, pero está limitada a distribuciones poco variables, y depende más en suposiciones teóricas. En el caso del método de indicadores, es más flexible porque se puede incorporar aspectos de la geología por medio de la codificación a indicadores (de presencia, ausencia, favorabilidad, etc.) de información subjetiva o descriptiva. El ejemplo presentado en este trabajo incorpora información geológica subjetiva.

Después de obtener el modelo de simulación, es muy importante verificar que efectivamente los valores obtenidos representan adecuadamente el histograma y el modelo de variograma deseado, aunque la reproducción nunca es exacta. También, se deben plotear los datos originales y los valores simulados a la misma escala, suficiente grande para apreciar el grado de condicionamiento observado.

Después de haber obtenido un número adecuado de estas simulaciones condicionales (generalmente del orden de 10 a 20), entonces para cada nodo en la grilla existe ese mismo número de valores simulados, todos con igual probabilidad de ocurrencia. Estos 10 o 20 valores por nodo representan en realidad la curva de frecuencia acumuladas de los valores posibles de ese nodo. Esta curva de probabilidad representa el rango de valores posibles del nodo, y por lo tanto el conjunto de nodos en la grilla es el modelo de incertidumbre buscado, a partir de cual se obtienen intervalos de confianza, probabilidades de exceder o no exceder ciertos valores específicos (leyes de corte, por ejemplo), etc. Hay que hacer notar que desde el punto de vista geoestadístico, cada uno de estos valores son igualmente válidos, es decir, cualquiera de ellos puede representar el valor real desconocido.

Con esta información (modelo de incertidumbre) es posible llevar a cabo un análisis de riesgos basado en la mejor información disponible sobre los posibles errores o diferencias con el valor más probable estimado. La Figura 1 muestra esquemáticamente el concepto de análisis de riesgo, presentado por medio de una "Función de Transferencia"¹, que significa el análisis del impacto de las posibles diferencias entre el valor real (desconocido) y el valor estimado como más probable. La columna izquierda muestra que de una estimación (por kriging en este ejemplo) del yacimiento se obtiene una sola "respuesta", o sea un valor único para cada bloque del modelo. Esa resultado único se procesa con la Función de Transferimiento (por ejemplo, planificación de la mina), con lo que se obtiene una predicción única de las toneladas y leyes, y los flujos de cajas correspondientes, a ser extraídos para cada período de tiempo considerado. En la segunda columna se compara con el proceso de simulaciones condicionales, por medio del cual se obtienen múltiples valores

¹ La "Función de Transferencia" es un nombre genérico aplicado a cualquiera de los procesos de análisis de un modelo de recursos. Más comúnmente, la Función de Transferencia se refiere a la optimización de rajos, diseño y planificación de la mina. Además, conceptualmente incluye la predicción de los flujos de caja que resultan de esta planificación de mina.

(10 o 20, según se mencionó más arriba) para cada bloque, cada uno de los cuales puede ser procesado independientemente, para obtener un rango de respuestas finales (representado con el histograma a la derecha y debajo en la Figura 1). En el ejemplo mencionado, el resultado final es una serie de planes mineros y flujos de cajas finales, de los cuales se puede extraer un análisis de riesgos detallados, incluyendo intervalos de confianza, mejor y peor escenario, probabilidad de no alcanzar el flujo de caja planificado, etc.

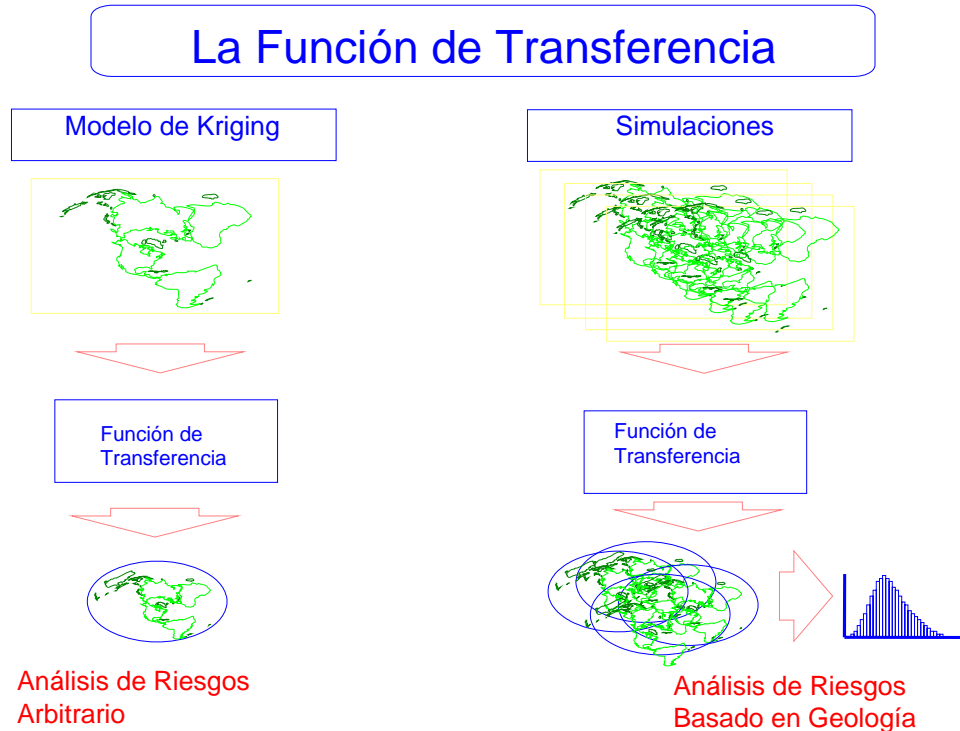


Figura 1: Análisis de Riesgos en base a simulaciones condicionales.



Figura 2: Mapa de Ubicación de la Mina Michilla.

3.0 Ejemplo de Aplicación: Mina Lince-Estefanía.

El yacimiento Lince-Estefanía se encuentra ubicado a unos 120 Km al norte de la ciudad de Antofagasta, cercano a la carretera pavimentada No. 1 que une las ciudades de Tocopilla y Antofagasta. Actualmente es explotado por Minera Michilla S.A. como Rajo a Cielo Abierto (Lince) y Mina Subterránea (Estefanía). El yacimiento está ubicado en la cordillera de la costa, a unos 900 msnm. Minera Michilla S.A. con oficinas principales en Antofagasta, es una subsidiaria de Anaconda Chile, con oficinas en Santiago, Chile. La mina Michilla produce aproximadamente unas 60.000 toneladas por año de cátodos de Cu, además de producir concentrados de cobre. La Figura 2 muestra un mapa de ubicación del distrito.

La geología del distrito muestra una secuencia volcano-sedimentaria de potencia muy significativa (Formación La Negra), inclinada unos 30° al NO, fundamentalmente compuesta por una serie de andesitas y brechas volcánicas de distintas características. La secuencia de andesitas varía de afanítica a porfírica, con brechas volcánicas intercaladas (“autobrechas”) que resultan ser las mejores receptoras de mineralización. Esta secuencia volcano-sedimentaria es conocida como Formación La Negra y ha sido descrita en detalle en la bibliografía especializada, ver por ejemplo Ferraris y Di Biase, 1978, Hoja Antofagasta, Carta Geológica de Chile, Instituto de Investigaciones Geológicas.

El modelo genético a la fecha sugiere que el cobre se ha diseminado en forma de cuerpos de alta ley según la receptividad de la roca de caja. El mineral oxidado más importante es la Atacamita, aunque también existe la Crisocola en cantidades significativas. En el distrito, la mineralización, principalmente atacamita y crisocola, está presente en la vecindad de intrusivos, generalmente dioríticos, que presumiblemente tienen relación con los fluidos mineralizantes. La distribución espacial de las leyes está también fuertemente controlada por un serie de estructuras principales, incluyendo la llamada Falla Muelle, aproximadamente de rumbo N45°E/N60°E, y su set de estructuras conjugadas.

Los cuerpos (“mantos”) mineralizados que resultan son de forma elipsoidal, concordantes con la estratificación, y de tamaño y ley variable, dependiendo en gran medida de la porosidad de la roca huésped, y de las estructuras locales que entrecruzan el yacimiento. Resulta difícil predecir el tamaño de los cuerpos individuales, así como la distribución de leyes dentro de cada cuerpo mineralizado. En general, la mayoría de estos cuerpos son de 4 a 5m de potencia promedio, con longitudes y anchos muy variables, de hasta 40 o 50m. Dentro de estos cuerpos se encuentran diversos rangos de ley, típicamente del orden de 1% a 5% CuT; leyes de 10% de CuT son relativamente habituales, con casos excepcionales de hasta 25% CuT y 15% CuS. El Rajo Abierto (la mina Lince) típicamente extrae cuerpos de hasta 5% CuT, con una ley de alimentación a la planta de cátodos de aproximadamente 1.6% CuT.

A principios del año 2000 se actualizó la base de datos existentes con sondajes obtenidos hasta el 31 de Diciembre de 1999. Esto se hizo previo a la revisión del modelo geológico y la actualización del modelo de bloques. El modelo computarizado geológico consiste en la obtención de una serie de sólidos. El modelo de leyes (Modelo de Recursos) fue estimado por medio de un Krigeage de Indicadores Múltiples. Esta es en parte la razón por la cual se escogió la simulación de indicadores como técnica de simulación. En la Figura 3 se muestra esquemáticamente el Flujo de los Datos y los trabajos involucrados en la ejecución de este Proyecto.



Figura 3: Flujo de la Información, Lince-Estefanía.

4.0 Modelo de Simulaciones Condicionales para Lince-Estefanía.

El modelo de simulaciones aplicado al yacimiento Lince-Estefanía se denomina Secuencial de Indicadores. Tal como se mencionó más arriba, fue desarrollado durante la segunda mitad de los años '80 para simular distribuciones de mineralización particularmente erráticas, y también donde existiera la conveniencia de incluir información (geológica) subjetiva como parte de la simulación.

Base de Datos y Topografía.

Minera Michilla utiliza en su base de datos un sistema de coordenadas local, derivadas de las coordenadas UTM, y que incluye una rotación, para manejar más efectivamente la información. Todos los datos presentados en este informe están referidos al sistema de coordenadas "Michilla", como se le conoce localmente.

La topografía utilizada en este trabajo incluye la topografía de la posición del Rajo Lince al 31 de Marzo de 2000, y las labores subterráneas según el desarrollo existente a la misma fecha. Estas topografías fueron modeladas en el sistema computacional con forma relativamente sencillas, é incluyen los

pilares y remanentes que pudieran existir (no extraíbles). Esta topografía se aplicó al modelo de kriging y al modelo de simulaciones para calcular la cantidad de aire (o roca) contenida en cada bloque. Su utilizó un valor de densidad constante para todo el modelo (a pesar de existir un modelo de densidades más sofisticados) ya que la densidad no afecta las comparaciones entre el modelo de kriging y el modelo de simulaciones.

Se obtuvieron compósitos de 5m a lo largo del sondaje a partir de las muestras originales de los sondajes. Esta longitud de compósitos se eligió porque es representativa de la unidad de selección minable para el método de corte y relleno aplicado en la mina subterránea, así como un submúltiplo de la altura de banco del Rajo Lince. De esta manera, los datos utilizados para hacer la estimación reflejan parcialmente una dilución representativa del proceso de extracción. Para las simulaciones de la geología del yacimiento, se agruparon las UG en tres categorías: Intrusivos y Brecha Tectónica combinadas; Brechas; y Brecha Seca y Andesitas combinadas.

Definición de Indicadores para las Simulaciones Secuenciales de Indicadores.

A técnica de simulación utilizada para este yacimiento se denomina Simulación Secuencial de Indicadores (Journel, 1988), y está basada en la técnica de krigeage de indicadores, la misma utilizada para obtener el Modelo de Kriging (de Recursos) del yacimiento. Para aplicar esta técnica, se deben primero definir una serie de indicadores para discretizar la población de compósitos de CuT. La definición de estos indicadores se hizo en base a una serie de estudios previos; se recuerda que los Modelos de Recursos han sido estimados por Kriging de Indicadores Múltiples. Esto implica que muchos de los análisis estadísticos y de variografía requeridos para las simulaciones ya han sido completados para el cálculo de recursos. Las clases de leyes de CuT utilizadas son: de 0.0 a 0.19% CuT; de 0.2 a 0.49% CuT; de 0.5 a 0.79% CuT; de 0.8 a 0.99% CuT; de 1.0 a 1.19% CuT; de 1.2 a 1.49% CuT; de 1.5 a 1.99% CuT; de 2.0 a 2.99% CuT; de 3.0 a 4.99% CuT; de 5.0 a 6.99% CuT; de 7.0 a 9.99% CuT; y mayor que 10.0% CuT.

Variogramas de Indicadores de CuT y de las UG.

Consistente con la metodología utilizada anteriormente, se obtuvieron una serie de variogramas para cada uno de los 11 indicadores que definen las clases descriptas arriba, a partir de los compósitos de 5m. Estos variogramas fueron modelados con estructuras esféricas, y están estandarizados a una varianza igual a 1.0. Por brevedad, estos variogramas no se muestran en este trabajo.

De estos modelos de variogramas, se pueden hacer algunas observaciones generales. Primero, según lo esperado, los variogramas de indicadores son más continuos para indicadores más bajos, i.e., para estéril o baja ley. Segundo, los efectos pepitas se incrementan según aumenta el indicador,

modelando la menor correlación espacial que se evidencia para leyes más altas. Tercero, existen distintas direcciones principales de anisotropía para distintos indicadores. Esto implica que existen distintas poblaciones de mineralización de Cu en el depósito, cada una con una distribución controlada por distintos eventos. De acuerdo a lo conocido geológicamente, por ejemplo, las leyes más altas de la mineralización obedecen a un control estructural mejor definido, con sus direcciones principales orientadas según las estructuras más significativas. Por otra parte, la mineralización de baja ley corresponde a un control estructural menos estricto, con una mayor diseminación (las anisotropías son menos marcadas), controlada primordialmente por la orientación de los mantos. Esto es, el control litológico, y en particular la porosidad de la roca, toma mayor importancia.

Definición de la Grilla de Simulaciones para todos los Modelos.

La grilla a ser simulada para todos los modelos alternativos analizados fué la misma que la utilizada para el Modelo de Recursos estimados en Marzo 2000. Tal como se hizo para la estimación de recursos, se sub-dividió el yacimiento en tres sectores principales: Lince (zona del Rajo actual), D4/Hilary (futura expansión), y Estefanía (bajo la cota 500m., mina subterránea). El origen de los modelos y la geometría en coordenadas Michilla es tal que el volumen modelado es de 2000x2100x950m, y la separación entre nodos simulados es de 5x5x5m. Hay que recordar que se simulan puntos, no bloques; como parte del post-procesamiento de las simulaciones, se promedian los nodos comprendidos dentro de cada bloque definido, para distintos tamaños de bloques.

El número total de nodos simulados es de más de 40 millones de nodos, considerando los tres sectores simulados. No todos estos nodos reciben un valor simulado, ya que se condicionó a la existencia de un nodo simulado a que exista al menos un compósito en la vecindad del nodo a ser simulado. Además, se restringió la existencia de mineralización a una envolvente de 0.1% CuT, interpretada a partir de la información de sondajes. Esta isoley determina el volumen dentro del cuál *podrían existir mantos*.

5.0 Descripción del Modelo de Simulaciones.

La técnica de Simulación Secuencial de Indicadores fué utilizada para obtener este modelo. Este modelo se obtuvo en dos etapas: primero, se simuló la geología del yacimiento, utilizando un Simulación de Indicadores de Variables Categóricas. Las Unidades Geológicas (UG) simuladas fueron las Brechas, las Andesitas (junto con Brecha Secas), y los Intrusivos (con las Brechas Tectónicas).

Esta simulación de las UG se efectuó (por razones prácticas) en una grilla de 15x15x5m. El producto de una simulación de geología es la probabilidad de que exista cada UG simuladas en un cierto nodo. La utilidad de incorporar la geología de esta manera a las simulaciones es que existe una relación modelable entre las UG y las leyes de CuT esperadas para esa UG. Por ejemplo, es conocido que las mejores de CuT se encuentran en la Unidad Brecha, mientras que las Andesitas son relativamente pobres. En el caso de los Intrusivos, la probabilidad de que exista mineralización es aún menor.

Las estadísticas de los sondajes se utilizan para derivar un vector de leyes probables para cada UG; por ejemplo, donde existe Brechas, la probabilidad de que la ley sea menor a 0.2% es del 57%, mientras que en el caso de las Andesitas es de 63.5%, y en el caso de los Intrusivos es más del 71%. Por el otro lado, la probabilidad de que las Brechas tengan una ley superior a 3% de CuT es de casi 10%; las probabilidades correspondientes para las Andesitas e Intrusivos es de 3.2% y 2.8%, respectivamente. Esta información se deriva de los sondajes originales, para cada uno de los indicadores utilizados. Simulando esta información se obtiene un vector de probabilidades para las leyes en la grilla de 15x15x5m, que se llama información secundaria (imprecisa) sobre las leyes, basado en la simulación de las UG.

La segunda etapa para obtener el Modelo de Simulaciones fué obtener las simulaciones de leyes de CuT, utilizando la simulación secuencial de indicadores, e incorporando los compósitos de 5m *además de las UG simuladas en malla de 15x15x5m.*

Plan de las Simulaciones.

Los parámetros de simulación más importantes para ambas etapas de simulación (de la variable categórica (UG) y de la ley de CuT) fueron:

- Se utilizó un radio de búsqueda 25m, aplicado a un elipsoide con la misma orientación del modelo de variogramas de las UG. En la dirección normal al plano de buzamiento, se aplicó un radio de búsqueda de 18.75m.
- Se requirió un mínimo de 2 muestras (compósitos) para simular un nodo, y se aceptó un máximo de 10 compósitos y 10 nodos previamente simulados. Simultáneamente, se aceptó un total de 3 compósitos y nodos por octante.
- Se aplicó un krigeage de indicadores múltiples, con los 11 indicadores mencionados anteriormente. Para obtener la curva de frecuencias acumuladas continua, se aplicó una extrapolación de los valores simulados superiores al último indicador definido (10% CuT), modelada con una curva hiperbólica con parámetro 3. Para los puntos intermedios de la curva se utilizó una interpolación lineal, así como para la extrapolación de los valores simulados por debajo del primer indicador utilizado y el mínimo definido (0.2% CuT, y 0% CuT respectivamente).

Este plan de simulaciones se mantuvo constante para los modelos de simulaciones en casi todos sus aspectos, excepto que existen distintos modelos de variograma por sector.

Después de obtener los modelos de simulaciones, se obtuvieron las estadísticas de los valores simulados (histograma, diagrama cuantil-cuantil, y variogramas), y se compararon con las correspondientes estadísticas de los compósitos. La reproducción de estas estadísticas fue buena. La Figura 4 muestra como ejemplo la comparación entre los valores de CuT de los compósitos y la distribución de los valores simulados para el Sector Lince.

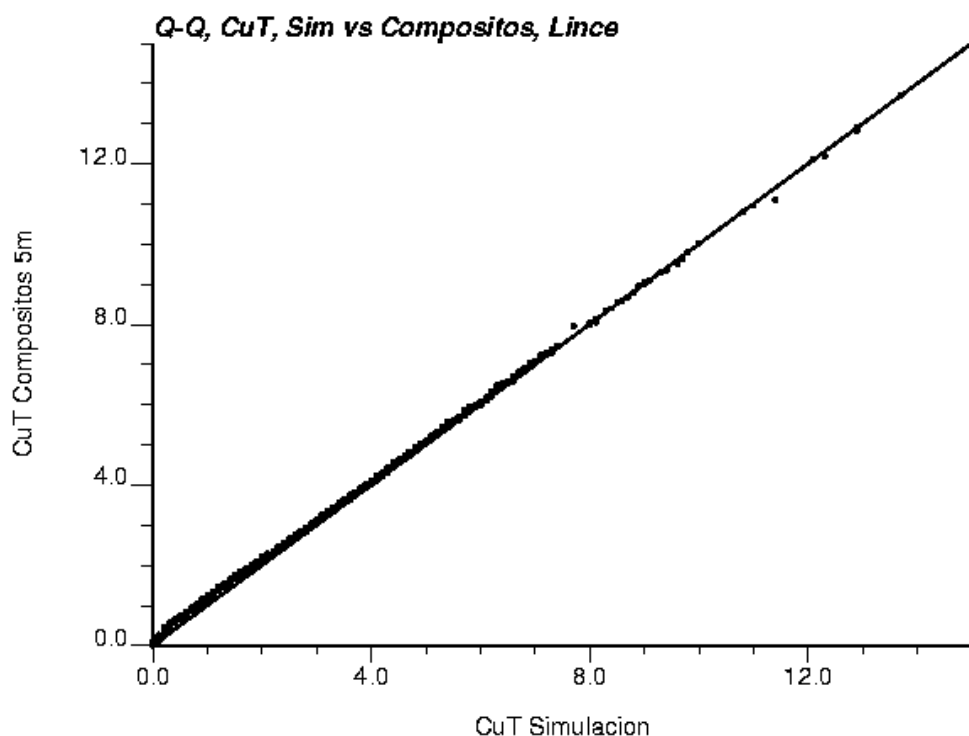


Figura 4: Comparación CuT, Nodos Simulados vs Compósitos 5m, Lince.

El modelo de simulaciones también reproduce bien las características espaciales de la mineralización. Esto se aprecia mejor en el análisis visual de las simulaciones en pantalla o con ploteos a escala suficiente. Este modelo requiere simular en dos etapas la mineralización: primero obtener la simulación de las Unidades Geológicas, y posteriormente utilizar esta información para simular las leyes de CuT. El trabajo adicional que representa simular la geología es compensado por la mejor reproducción de la mineralización y la incorporación en el modelo de simulaciones de la incertidumbre relacionada a

la interpretación geológica. La Figura 5 muestra la planta 690 del sector Lince, Simulación No. 1.

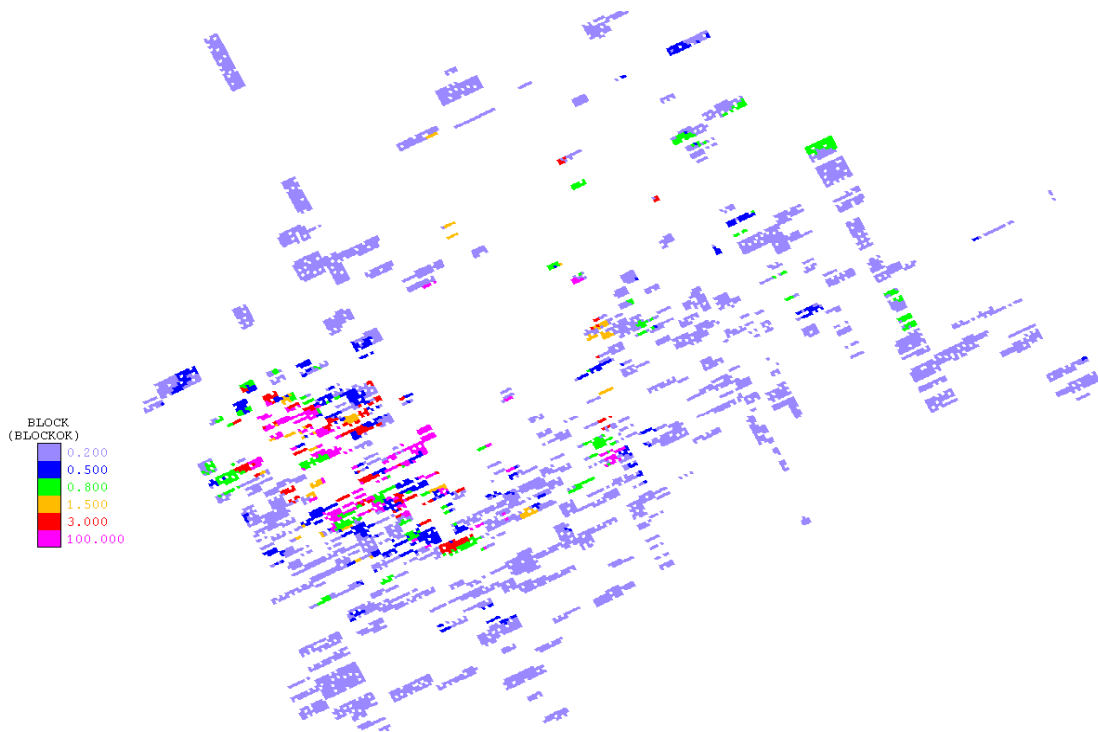


Figura 5: Banco 690, Simulación No. 1, Lince.

6.0 Límites de Probabilidad por Sector, o Intervalos de Confianza.

Se realizó una comparación entre los Recursos categorizados como Medidos, Indicados, e Inferidos y los límites probabilísticos obtenidos a partir de las simulaciones.

Originalmente, el estudio fué realizado para 17 distintos sectores productivos, además del promedio global para estos mismos sectores. Es importante recalcar que éste es uno de los aspectos más atractivos de este tipo de análisis, al poder discriminar por unidad de explotación que tienen una fecha de extracción u otra característica importante establecida en el plan minero, de manera tal que permite asegurar los flujos de caja predichos.

Los sectores que se presentan en este trabajo fueron definidos como los más consecuentes para el plan minero, tanto de la mina subterránea (Estefanía) como del Rajo Lince: Sector A1; Sectores D1/D2; Sector D4 (Rajo); Fase 7 Tentativa (Rajo, programada).

Cada uno de estos sectores están representados por sólidos tri-dimensionales, tal que se utilizan para definir los volúmenes de interés en el yacimiento. A partir de estos se extraen los bloques del modelo de estimación (por kriging de indicadores) que corresponden a los distintos sectores, con su ley de CuT estimada y también la clasificación asignada (medido, indicado, o inferido).

Estos bloques se procesaron individualmente, comparándolos con el modelo de simulaciones condicionales obtenido. De los valores simulados para cada bloque, se obtuvieron los límites probabilísticos promedio para cada sector. Todas las leyes medias fueron transformadas inicialmente a fino contenido (considerado un factor de densidad constante), a partir de la cual se manejó la siguiente información:

- Promedio del Sector según el Modelo de Bloques (“Prom. MB” en los gráficos).
- Promedio de los valores simulados para el Sector (“Prom. Sims” en los gráficos).
- Límite Inferior de Probabilidad, que es la diferencia relativa entre el promedio de las simulaciones que representan el percentil 30 de la distribución de valores posibles para cada bloque y el valor del modelo de bloques (“Lim. Inf.”).
- Límite Superior de Probabilidad, que es la diferencia relativa entre el promedio de las simulaciones que representan el percentil 70 de la distribución de valores posibles para cada bloque, y el valor del modelo de bloques (“Lim. Sup.”).

Dado que existe una relación entre el grado de riesgo asociado a un cálculo de recursos y reservas, todos los resultados se presentan para 4 leyes de corte: 0% CuT (o global), 05% CuT, 1% CuT, y 1.2% CuT. Los resultados están expresados en Ley de CuT, y los Límites probabilísticos Inferior y Superior son con respecto al valor estimado por el Modelo de Bloques. También, los resultados se dan individualmente para cada sector, por clase (**medido, indicado, e inferido**), y como promedio para el sector completo (**reservas totales**). Los promedios fueron obtenidos ponderando por el volumen correspondiente a cada clasificación.

7.0 Análisis de los Resultados y Conclusiones

Más allá de las características particulares de cada Sector que se describen más abajo, se pueden extraer algunas conclusiones generales e importantes:

1. El promedio de los valores simulados no concuerdan necesariamente con la ley estimada por el Modelo de Bloques para el Sector. Esto es un reflejo de las diferencias entre el modelo de simulación y el de estimación, del cual se considera un factor importante la incertidumbre asociada al modelo de geológico.

2. Los valores simulados resultan en intervalos probabilísticos (niveles de confianza) que no son simétricos con respecto al valor más probable. El tradicional “±10%” no se aplica. La razón está en que las leyes de CuT no siguen un modelo Gaussiano, sino que tienen una distribución sesgada, con una “cola” de leyes altas.
3. Es posible que el valor estimado por el Modelo de Bloques quede afuera del intervalo de confianza derivado de las simulaciones, por ser el modelo de simulaciones independiente del modelo de estimación.
4. En todos los casos, los intervalos de confianza son diferentes para cada ley de corte analizada. Claramente, el comportamiento de la curva de tonelaje-ley del Modelo de Bloques estimado será diferente del de las simulaciones.
5. La clasificación “tradicional” de medidos, indicados, e inferidos es de poca utilidad para analizar la incertidumbre de los recursos y reservas en Sectores locales. La razón es que esta clasificación se desarrolla (y es aplicable) a los recursos “globales”, apropiada para clasificar material a ser extraído en el largo plazo. Es cuestionable su utilización en la Planificación de Corto Plazo, porque a mayor volumen considerado (estimado o simulado), la precisión será de los estimadores será mayor. Esto corresponde a la idea intuitiva de que es más fácil estimar la ley de un yacimiento completo, que la de un mes de producción.
6. Los recursos Medidos muestran una variabilidad importante, aún cuando se los considere medidos. Al mismo tiempo, el material “medido” en un sector del yacimiento (por ejemplo con intervalos de confianza del orden del 20%), no es necesariamente equivalente al “medido” en otros sectores del yacimiento. Esto se debe principalmente a diferencias locales en la complejidad de la geología y la distribución de las leyes, y al hecho que no todos los sectores tienen la misma densidad de información.

Los comentarios específicos para cada Sector considerado en este Trabajo se presenta a continuación:

- **Sector Fase 7 (Rajo Lince, Figuras 6(a) a 6(d)):** las simulaciones predicen, para una ley de corte de 0.5% CuT (aproximadamente la ley de corte económica), que el Modelo de Bloques es conservador, pero para leyes de corte superiores a 0.5% la situación se invierte, siendo el Modelo de Bloques optimista. Esto se dá para las tres categorías de clasificación, medidos, indicados, e inferidos, así como para el total ponderado.
- **Sector D4 (Rajo, Figuras 7(a) a 7(d)):** nuevamente, las simulaciones predicen que el Modelo de Bloques es conservador, esta vez para todo el rango de leyes de corte considerados (aunque bastante menos para las leyes de corte altas). Se nota claramente la mejor precisión de las reservas “medidas”, comparado con las reservas “indicadas”, y más aún con referencia a las “inferidas”.
- **Sector D1/D2 (Subterráneo, Figuras 8(a) a 8(d)):** En primera instancia, aparentemente este Sector también las simulaciones condicionales son optimistas con respecto a las predicciones del Modelo

de Bloques. Sin embargo, no es así porque: a) por ser material a ser extraído por métodos subterráneos, la ley de corte utilizada es mayor (1.0% CuT); b) la mayoría de las reservas incluidas en el plan minero son “indicadas”, para las que se observa que el riesgo de las reservas puede ser significativo. Los intervalos de confianza para las reservas “indicadas” al 1% de CuT de ley de Corte son de $-17\%/+5\%$; o sea, la ley verdadera puede ser entre 17% menor y 5% mayor que la estimada.

- **Sector A1 (Subterráneo, Figuras 9(a) a 9(d)):** En este Sector las simulaciones predicen una ley menor para los bloques medidos, pero una ley mayor para los bloques indicados. La mayor parte de los bloques del Sector son “Indicados”, por lo que las Simulaciones pronostican potencial para una mayor producción de fino en el Sector. La variabilidad para este Sector está dentro del mismo orden de magnitud que otros sectores de características similares, no mostrados en este trabajo.

Como se puede deducir del simple resumen expuesto arriba, la cantidad de información disponible en un modelo de simulaciones es mucho mayor que la presentada aquí. Como consecuencia de análisis como los presentados aquí y otros, se implementan campañas de sondeos orientadas a disminuir el riesgo relacionado con un plan minero específico. También, dentro de lo posible, se pueden hacer modificaciones al plan minero como para extraer aquellas zonas de menor riesgo primero, asegurando el flujo de caja al corto plazo, y permitiendo afianzar las reservas del medio plazo.

8.0 Agradecimientos

Se agradece la oportunidad de implementar estas técnicas y publicar este trabajo a la Gerencia de Operaciones y Gerencia General de Minera Michilla S.A. También se agradece el apoyo de todo el personal de la Superintendencia de Geología de Minera Michilla S. A.

9.0 Referencias

- Alabert, F.G., ‘Stochastic Imaging of Spatial Distributions Using Hard and Soft Information’, Tesis de Maestría, Stanford University, 197 pp, 1987.
- Deutsch, C.V., y Journel, A.G., “GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide”, Oxford University Press, 340 p., 1992.
- Ferraris y Di Biase, 1978, Hoja Antofagasta, Carta Geológica de Chile, Instituto de Investigaciones Geológicas.
- GeoSystems International, Noviembre 1997, *Informe Estudios Gemelos y Desviación de Sondajes, Cía. Minera Michilla, S.A.*, 35p.
- GeoSystems International, Julio 1998, Informe Cálculo de Recursos y Reservas, Lince-Estefanía, Minera Michilla, S.A., 78p más Anexos.
- GeoSystems International, Mayo 1999, *Informe Actualización Cálculo de*

Recursos, Lince-Estefanía, Minera Michilla, S.A., 70p más Anexos.

- Goovaerts, P., "Geostatistics for Natural Resources Evaluation", Oxford University Press, 483p, 1997.
- Isaaks, E.H., "The Application of Monte Carlo methods to the Analysis of Spatially Correlated Data", Tesis Doctoral, Stanford university, Stanford, CA, 1990.
- Journel, A.G., "Fundamentals of Geostatistics in Five Lessons", Stanford Center for Reservoir Forecasting, Stanford, California, 1988.
- Journel, A.G., y Huijbregts, Ch.J., "Mining Geostatistics", Academic Press, 600 p., 1978
- Matheron, G., "Forecasting Block Grade Distributions: the Transfer Functions", en Geostat 75, pp. 237-251.
- Rossi, M.E., "Improving on the Estimation of Recoverable Reserves", Sociedad de Ingenieros de Minas, EEUU, Mining Engineering, Colorado, Enero 1999.
- Rossi, M.E., y Alvarado C., S.B., "Conditional Simulations Applied to Recoverable Reserves", XXVII Simposio Internacional de Aplicaciones de la Computación a las Industrias Minerales (APCOM), Londres, Gran Bretaña, 19-23 Abril, 1998.
- Rossi, M.E., y Van Brunt, B.H., "Optimizing Conditionally Simulated Orebodies", "Optimizing With Whittle '97 Conference", Abril 7-10, 1997, Perth, Australia, pp. 93-100.

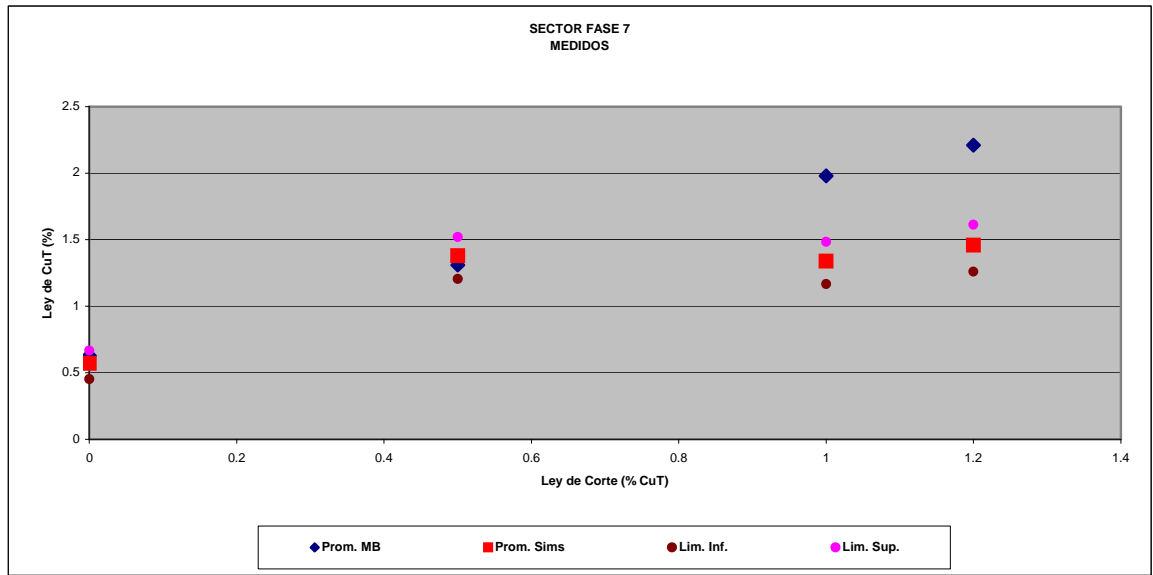


Figura 6(a): Reservas Medidas, Sector Fase 7 (Rajo).

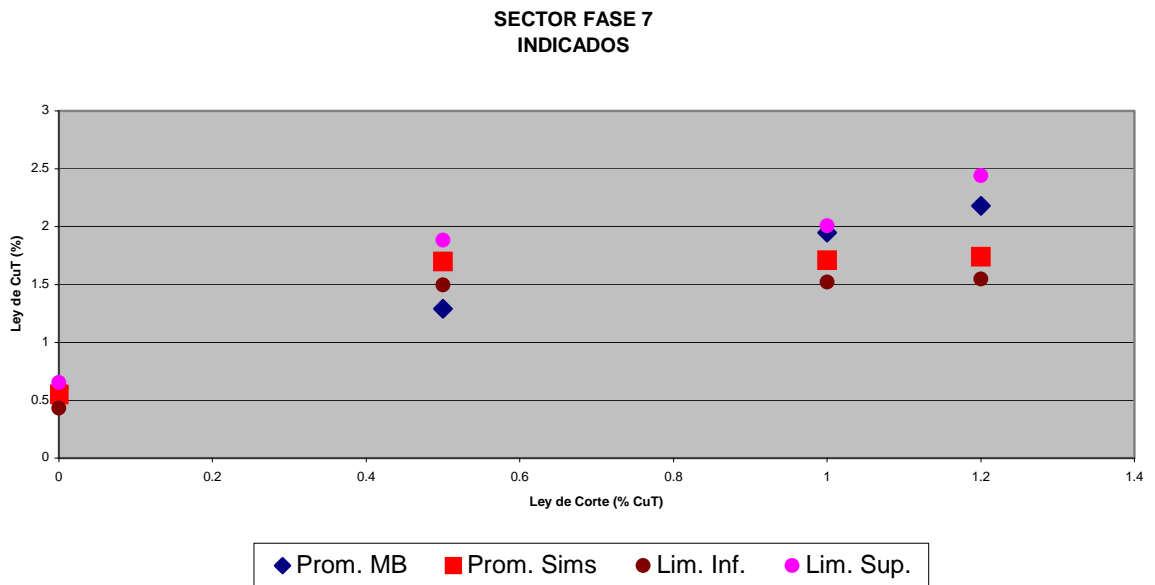


Figura 6(b): Reservas Indicadas, Sector Fase 7 (Rajo).

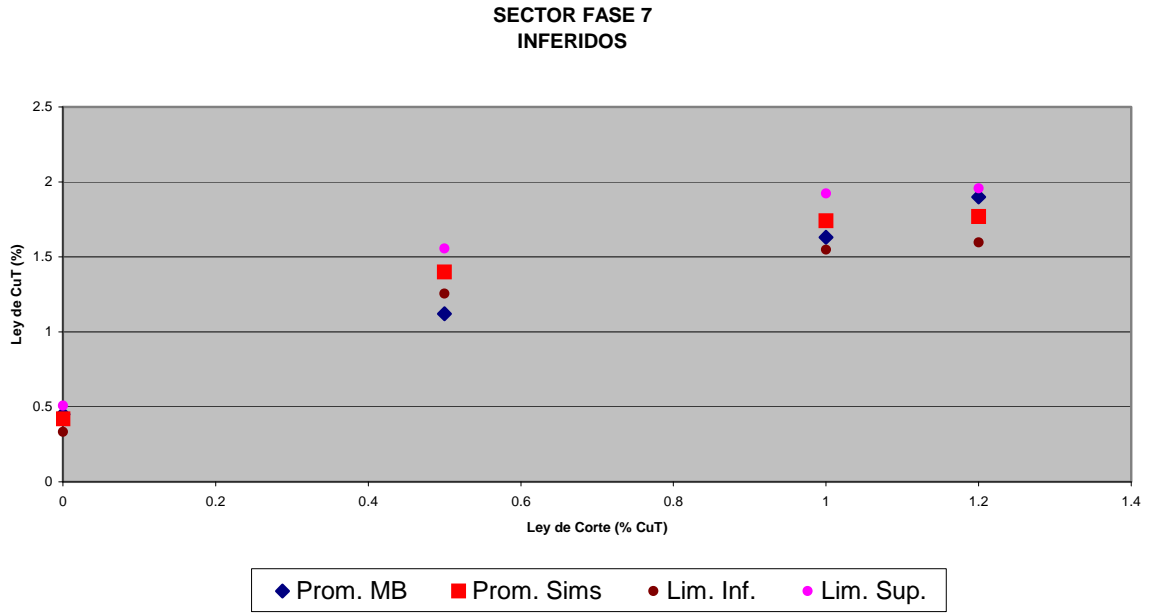


Figura 6(c): Reservas Inferidas, Sector Fase 7 (Rajo).

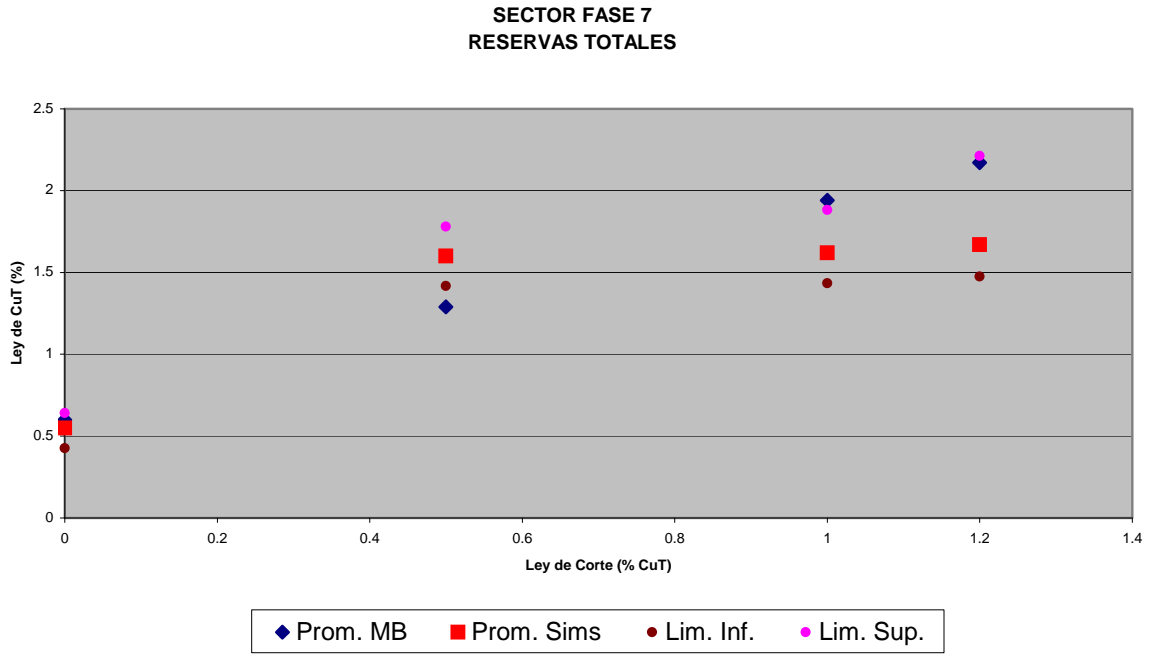


Figura 6(d): Reservas Totales, Sector Fase 7 (Rajo).

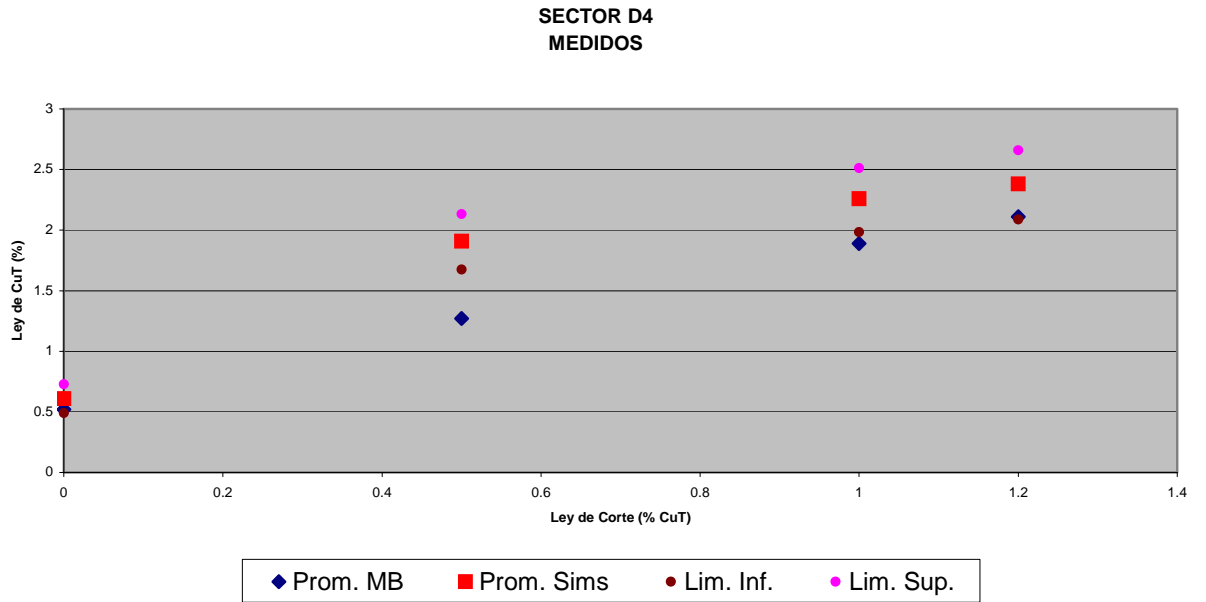


Figura 7(a): Reservas Medidas, Sector D4 (Rajo).

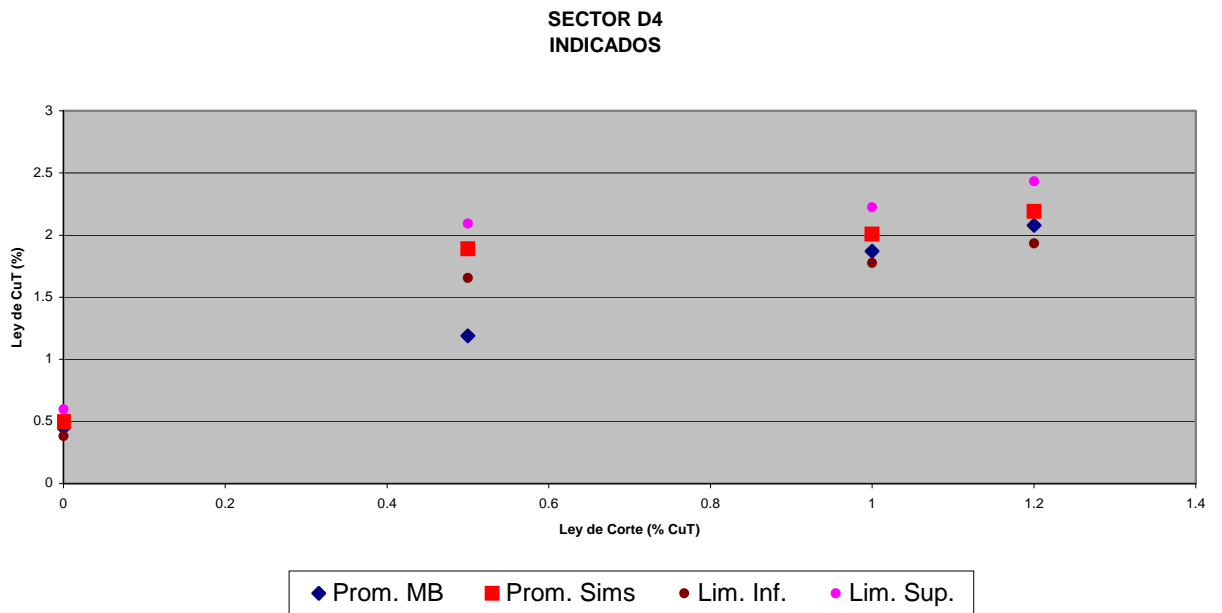


Figura 7(b): Reservas Indicadas, Sector D4 (Rajo).

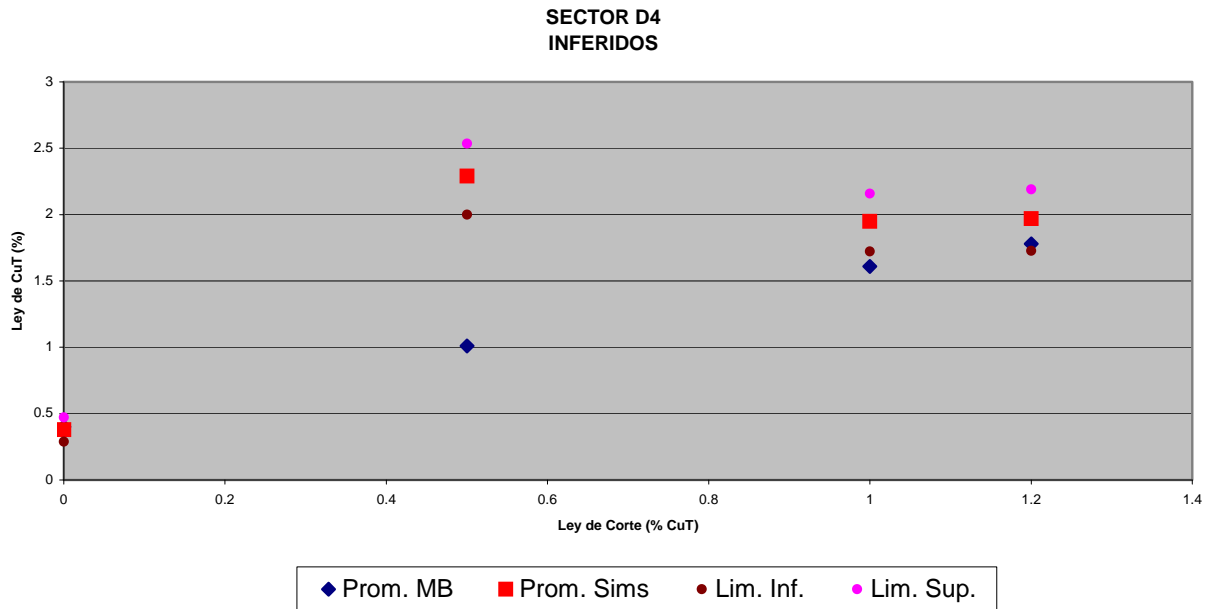


Figura 7(c): Reservas Inferidas, Sector D4 (Rajo).

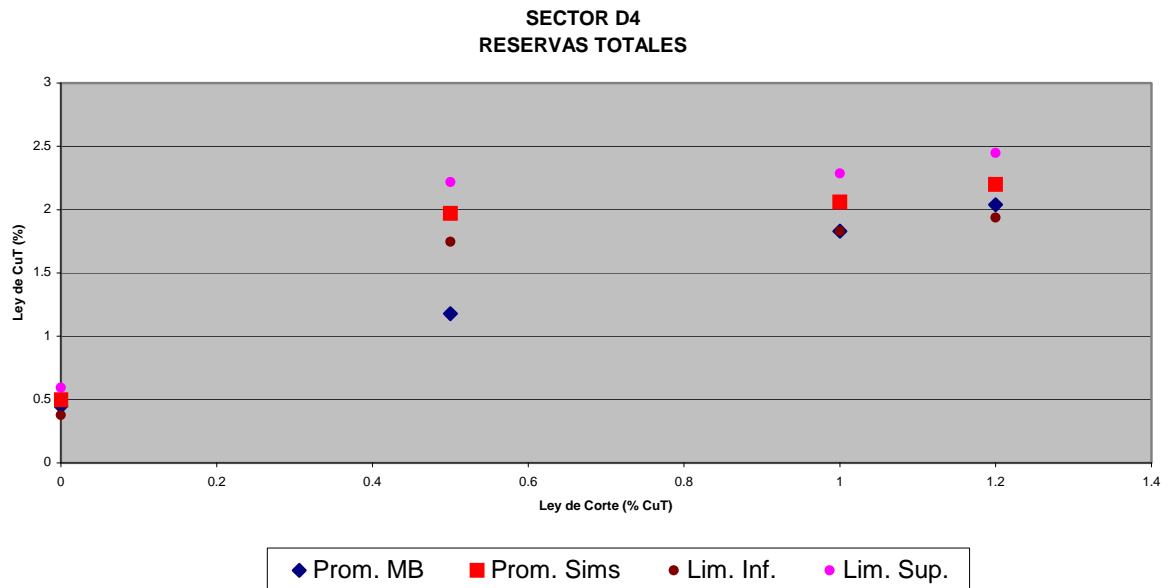


Figura 7(d): Reservas Totales, Sector D4 (Rajo).

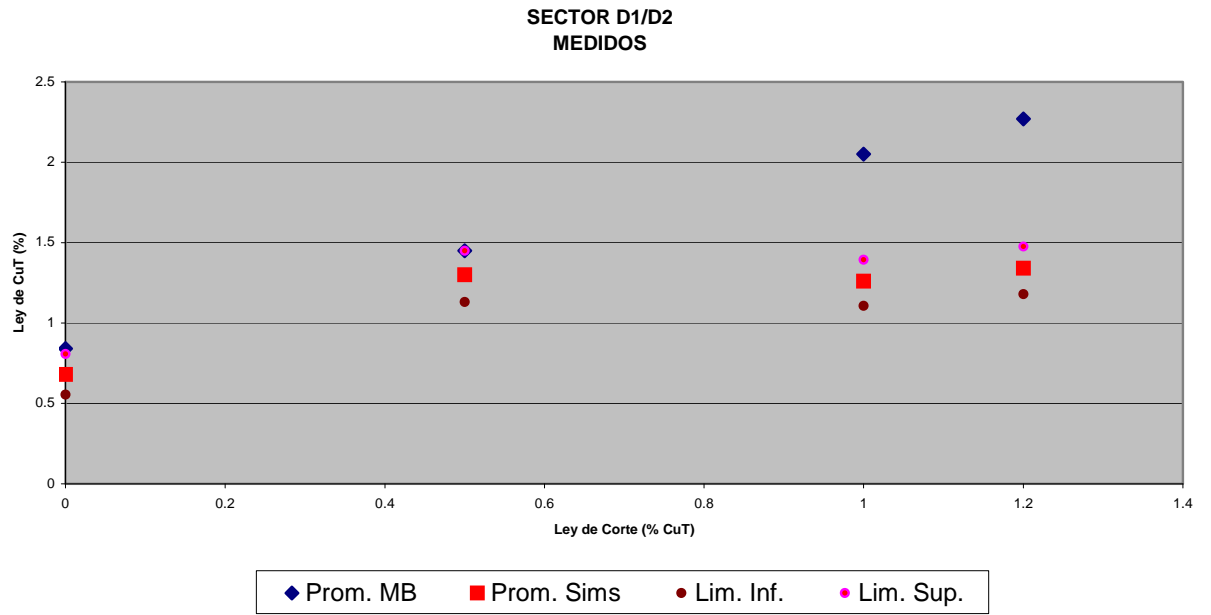


Figura 8(a): Reservas Medidas, Sector D1/D2 (Corte y Relleno).

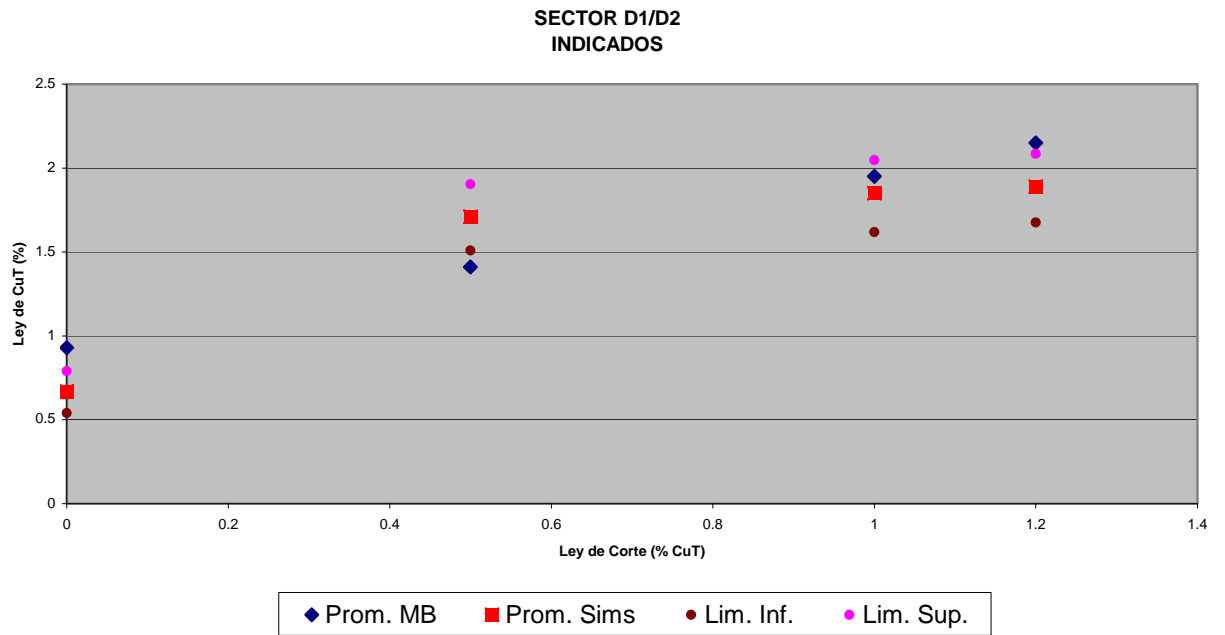


Figura 8(b): Reservas Indicadas, Sector D1/D2 (Corte y Relleno).

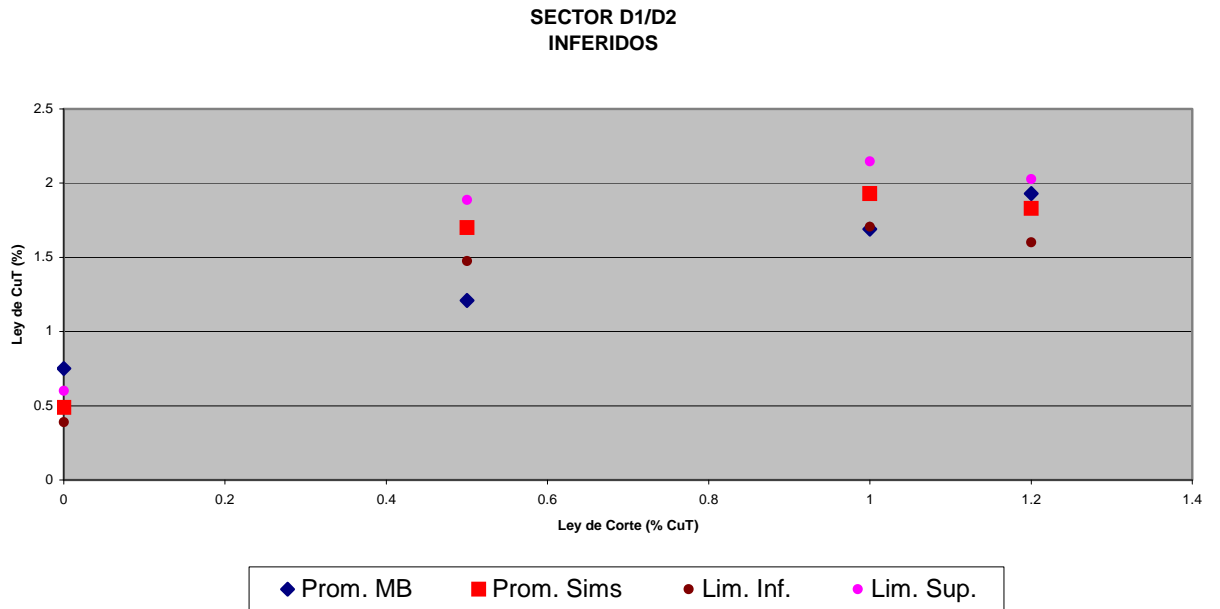


Figura 8(c): Reservas Inferidas, Sector D1/D2 (Corte y Relleno).

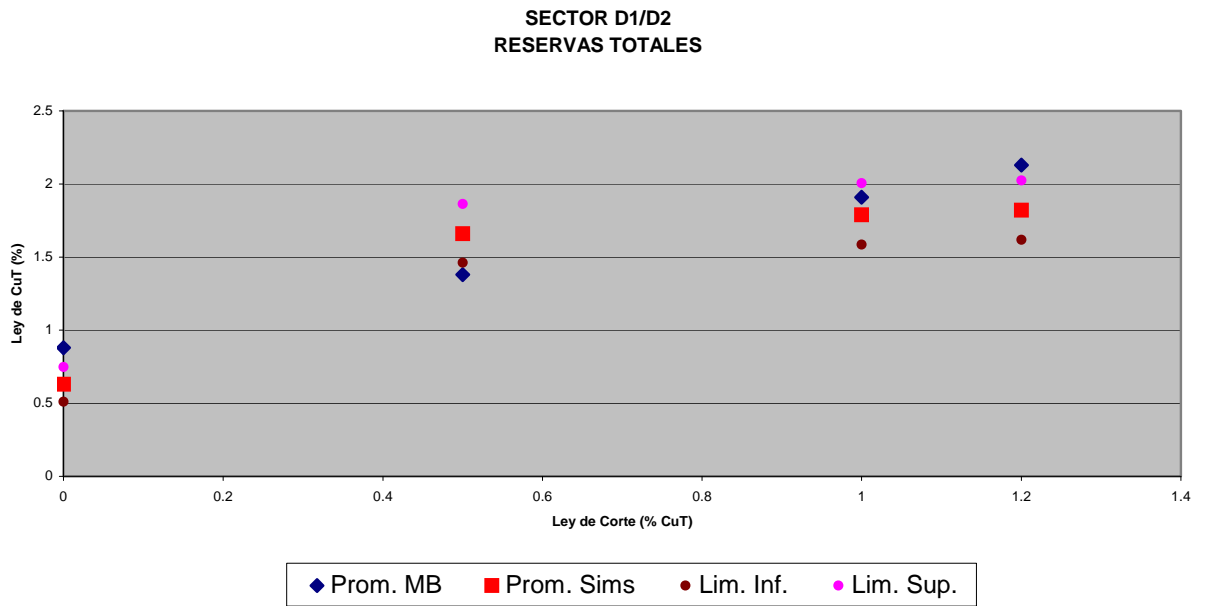


Figura 8(d): Reservas Totales, Sector D1/D2 (Corte y Relleno).

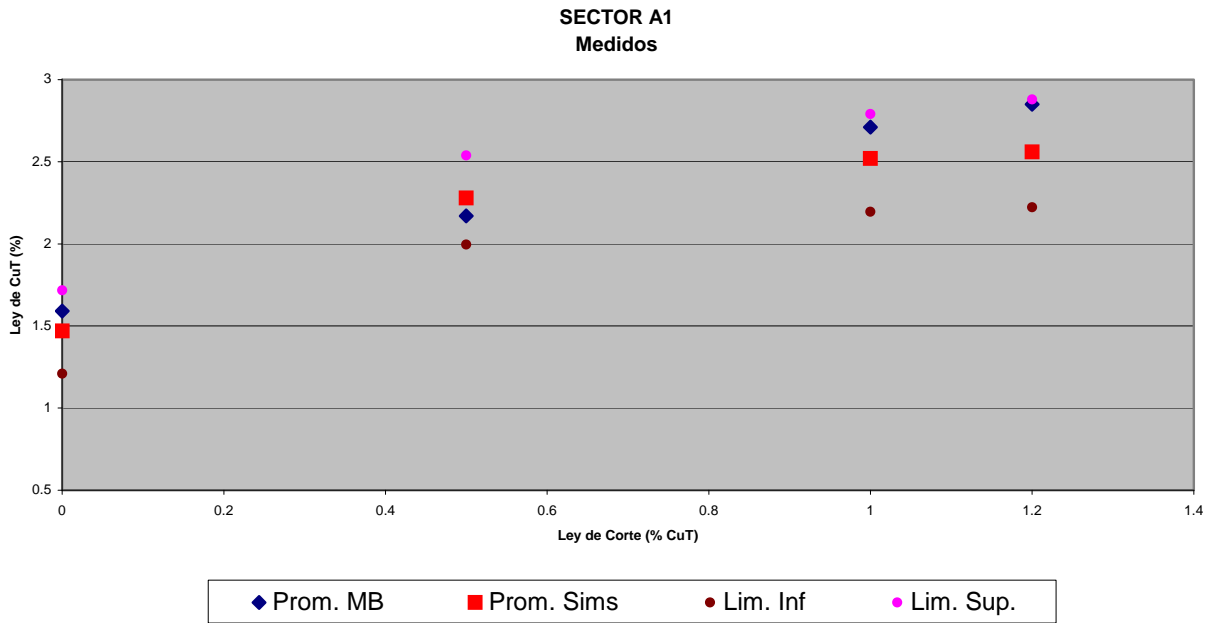


Figura 9(a): Reservas Medidas, Sector A1 (Corte y Relleno).

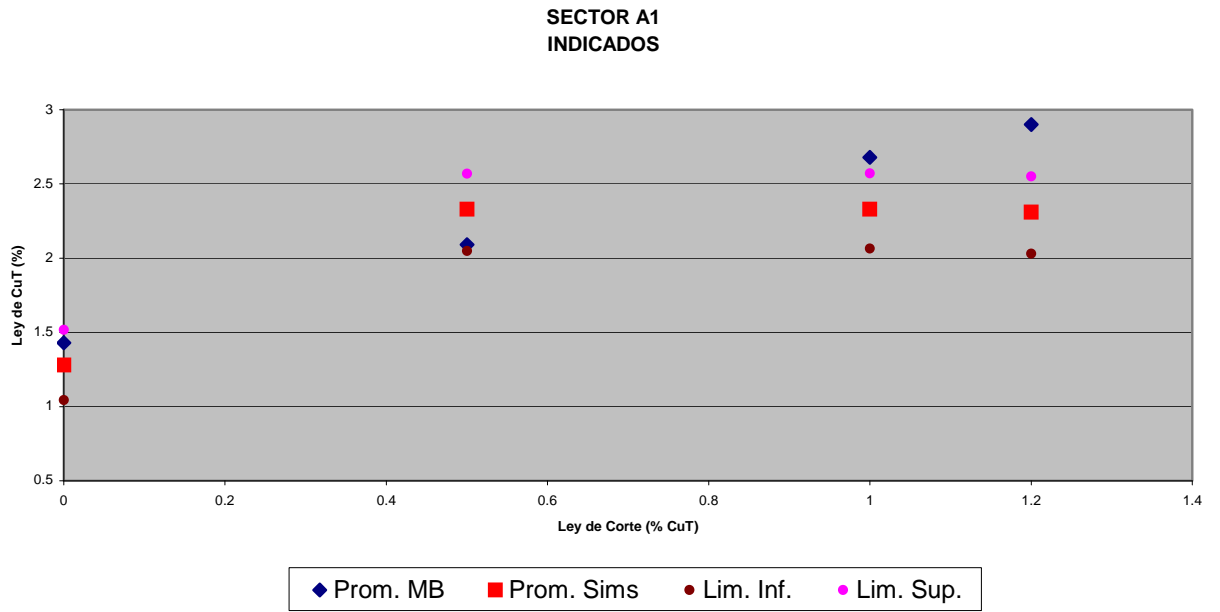


Figura 9(b): Reservas Indicadas, Sector A1 (Corte y Relleno).

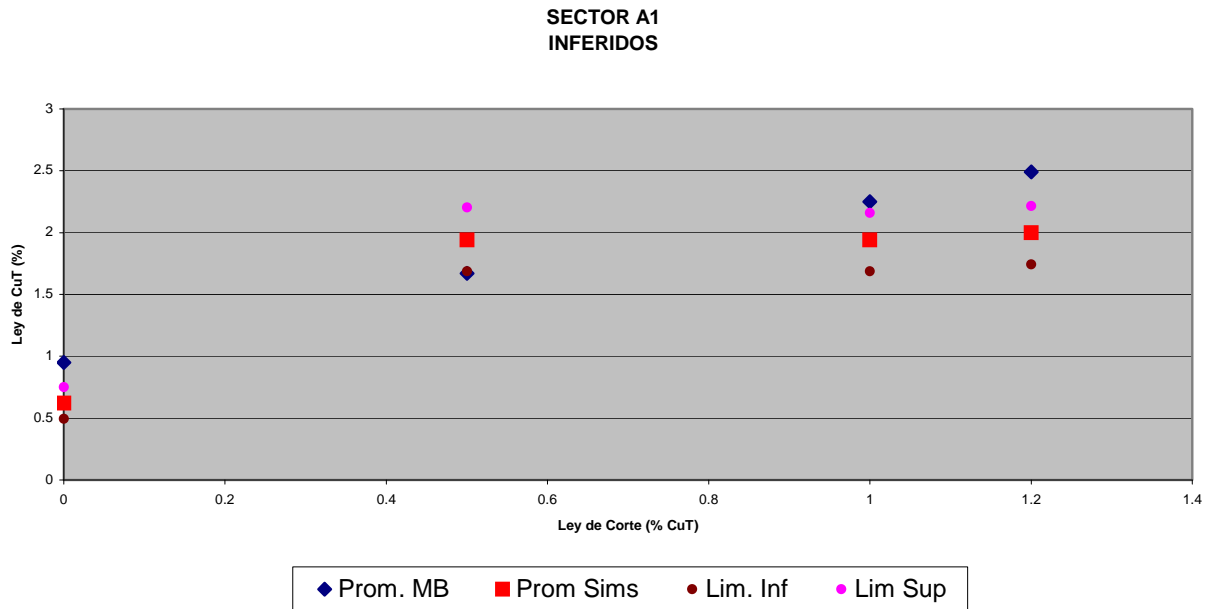


Figura 9(c): Reservas Inferidas, Sector A1 (Corte y Relleno).

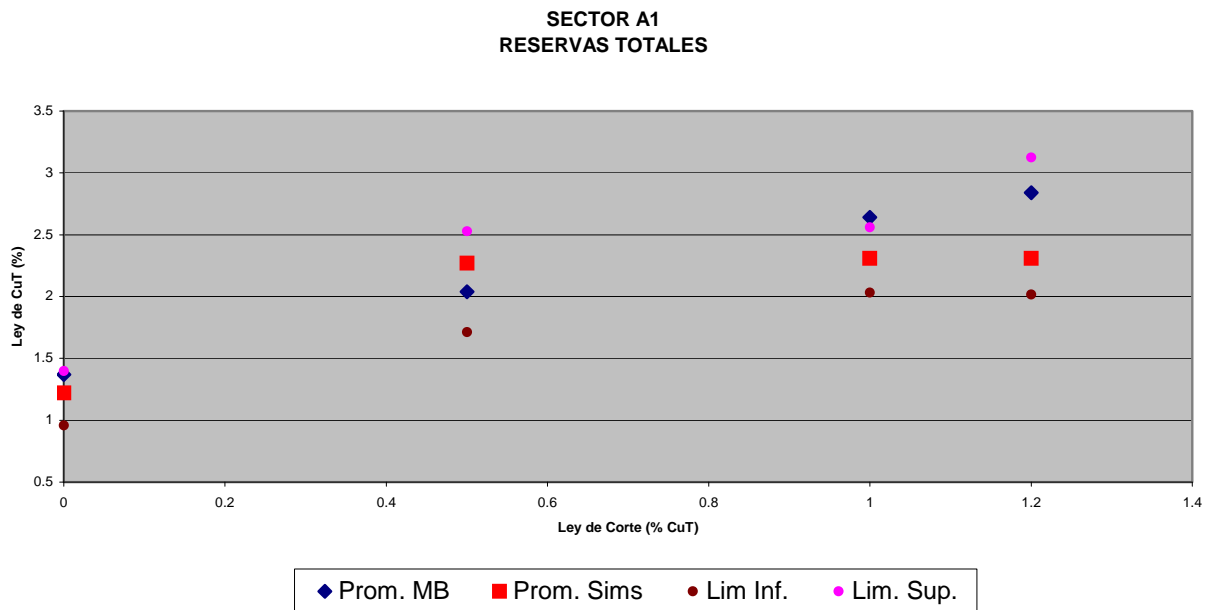


Figura 9(d): Reservas Totales, Sector A1 (Corte y Relleno).