

# COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS PARA CALCULAR PIT FINAL ROBUSTO BAJO INCERTIDUMBRE DE LEYES

ENRIQUE JÉLVEZ<sup>\*(a,b,c)</sup>  
 NELSON MORALES<sup>(a,b)</sup>  
 GONZALO SEPÚLVEDA<sup>(a,b)</sup>

a) Advanced Mining Technology Center

b) Delphos Mine Planning Laboratory, Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad de Chile

c) Fundación CSIRO-Chile

## Introducción

El pit final es la envolvente económica de bloques que maximiza el valor y respeta ciertos ángulos de talud. En este trabajo se revisan y comparan los distintos enfoques para calcular pit final robusto considerando distintas representaciones de un depósito, mediante N simulaciones condicionales, y a partir de ahí, se propone un enfoque que busque un equilibrio entre dos objetivos en conflicto: maximizar valor y minimizar el riesgo.

### Problema de pit final (PPF)

Max (valor de X)  
 X es un pit

### Enfoques

- Promedio:** En base a múltiples escenarios de leyes, encontrar un **escenario promedio** (valor esperado), al cual se calcula pit final (Marcotte et al. 2009).
- Simulaciones:** calculando pit final en cada escenario, elegir **el pit asociado al escenario con mayor valor** (Dimitrakopoulos et al. 2007).
- Confiabilidad:** calculando pit final en cada escenario, es posible definir para cada bloque la “confiabilidad” de pertenecer al pit final robusto como la frecuencia relativa de pertenecer el pit final a lo largo de los escenarios.
  - Pits híbridos:** define H-pit(m) como el pit formado por **todos los bloques con confiabilidad de al menos m/N** (Whittle et al. 2007). Elige uno como pit final.
  - Frecuencia:** calcula pit final modificando el objetivo en (PPF): **maximizando el producto entre valor y confiabilidad de los bloques** (Jélvez et al. 2015).
- Probabilístico:** **incorpora de manera explícita todos los escenarios** en un modelo de programación matemática, con restricciones de probabilidad o *chance constraints* (Vielma et al. 2009)

Max z  
 Prob (valor de X ≥ z) ≥ δ  
 X es un pit

Los diferentes enfoques pueden ser comparados en base al enfoque probabilístico para distintos valores del parámetro δ (nivel de confianza).

- Maximizando valor y minimizando CVaR:** calcula pit final modificando el objetivo en (PPF): maximizando una combinación convexa entre el valor de la envolvente y – CVaR, buscando un equilibrio entre los dos objetivos en conflicto: valor y riesgo (Jélvez et al. 2015).

Max [ β (valor de X) – (1 - β) CVaR ]  
 X es un pit

## Experimentos

- Depósito de 31.872 bloques
- 50 simulaciones condicionales
- Software: **MineLink** + PuLP + Gurobi

## Resultados

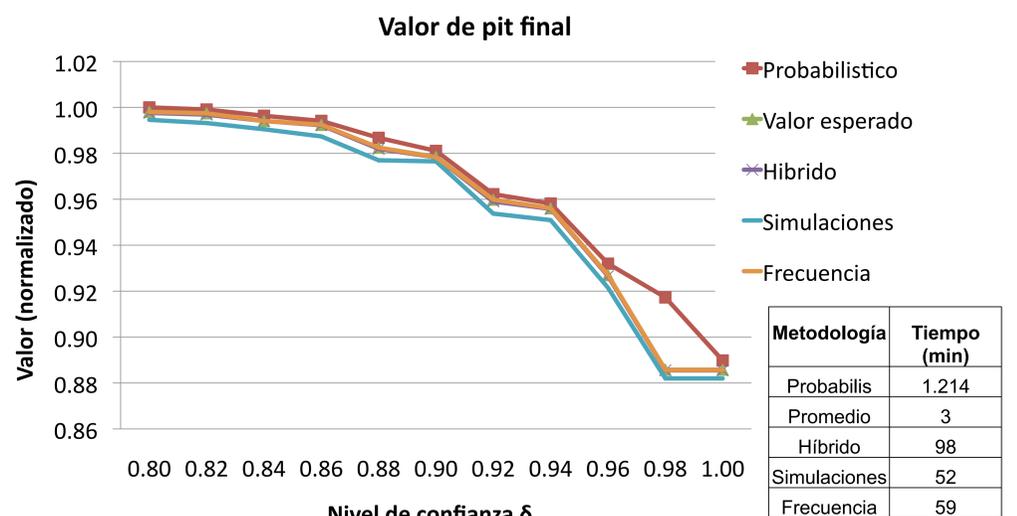


Fig. 1: Valor de pit final (normalizado) para cada enfoque 1-2-3.1-3.2 y 4 para distintos niveles de confianza. También se muestran sus tiempos de cómputo.

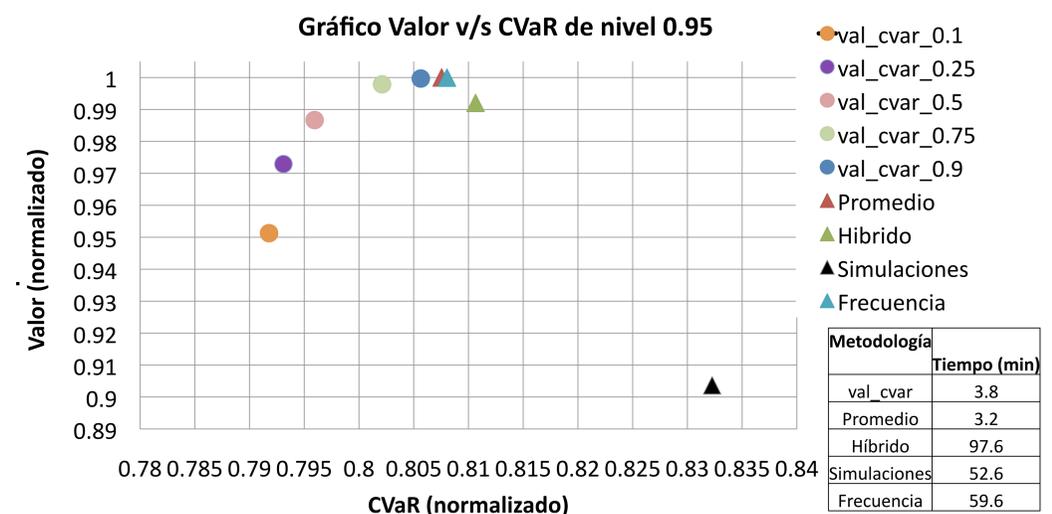


Fig. 2: Trade-off entre valor de pit final y valor condicional en riesgo (normalizados) para cada enfoque 1-2-3.1-3.2 y 5 (este último para distintos valores de β). También se muestran sus tiempos de cómputo.

## Conclusiones

Existen distintos enfoques que incorporan la incertidumbre de leyes para determinar el pit final. Algunos (4) incorporan explícitamente el riesgo, pero toman mucho tiempo de cómputo. Por otra parte, existen otros enfoques heurísticos (1-2-3.1-3.2) que son mucho más rápidos, pero no toman en cuenta el riesgo directamente, sino más bien, fuera del cálculo de pit final. Sin embargo, algunos enfoques como (3.1-3.2) muestran buenos resultados usando el concepto de confiabilidad. En particular, (5) es una buena manera de evaluar los objetivos que típicamente se encuentran en conflicto (valor y riesgo).

\* Autor Principal: ejelvez@ug.uchile.cl