

NOVIEMBRE 2025

Impacto de la pendiente de rampas en el diseño de tajo final y su relación con las reservas totales minables.

Ing. Dora Elia Pérez R.
Ing. Ana Patricia López V.



Introducción

La optimización del diseño de rampas en minas a cielo abierto es fundamental para **maximizar las reservas minables** y **garantizar la seguridad** y eficiencia en las operaciones.

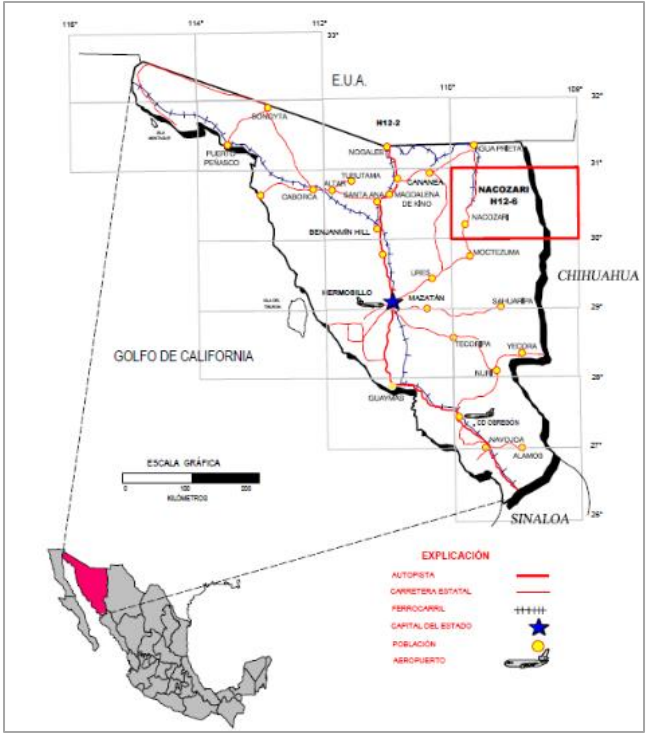
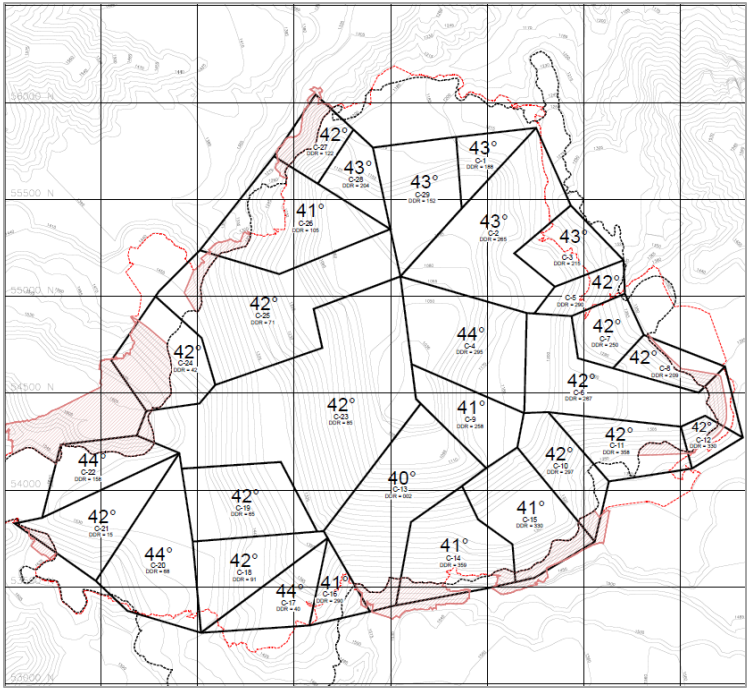
La pendiente de las rampas influye directamente en la accesibilidad, costos y volumen de reservas recuperables, por lo que comprender su impacto es clave para mejorar los diseños mineros.

Objetivo

Analizar cómo la variación en la pendiente de las rampas afecta el diseño del tajo final y la cantidad de reservas **totales minables**, proponiendo recomendaciones para optimizar ambos aspectos.

Ubicación

El estudio se realiza en mina **La Caridad** que es una mina a cielo abierto ubicada en el Nacozari de Garcia, Sonora. Aproximadamente a 200 km en línea recta al noroeste de la capital de estado: Hermosillo; caracterizada por sistema de pórfido cuprífero tipo diseminado, con presencia de minerales como calcopirita, pirita y molibdenita principalmente.

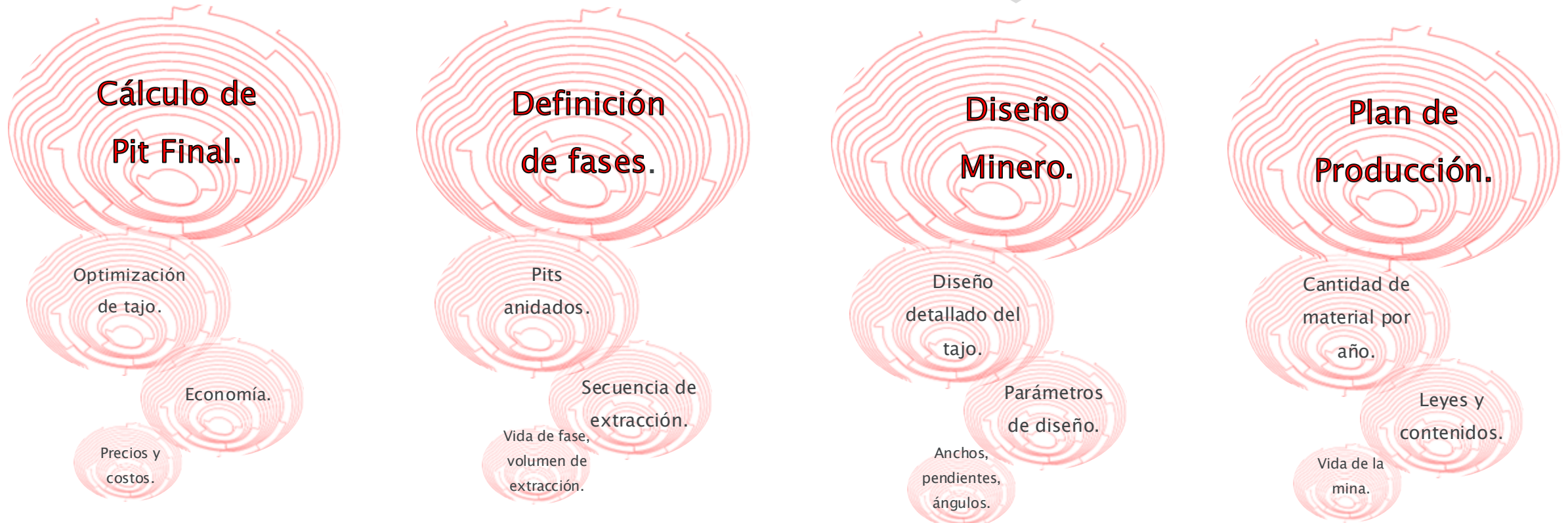


El desarrollo de la mina es en sentido vertical desde la elevación 1800 hasta la elevación 1080 m.s.n.m., con 15 metros de altura de banco, con anchos de caminos de 40 metros y pendientes variables.

Los ángulos de talud, caras de banco y anchos de banquetta se determinan a través del estudio geotécnico elaborado por Call & Nicholas Inc. en 2024.

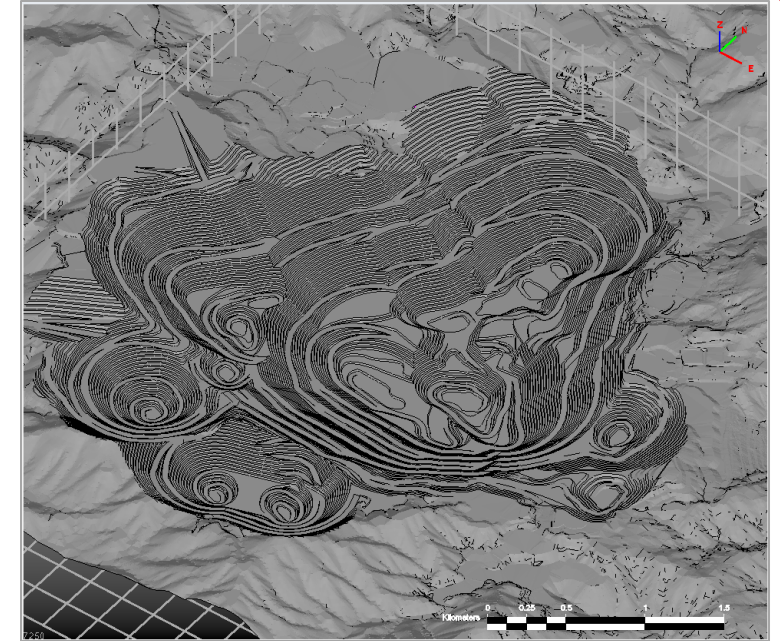
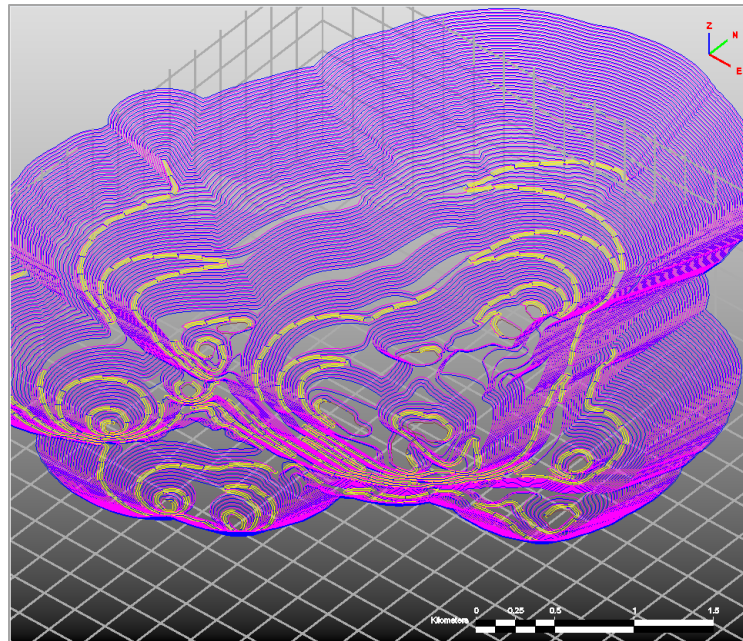
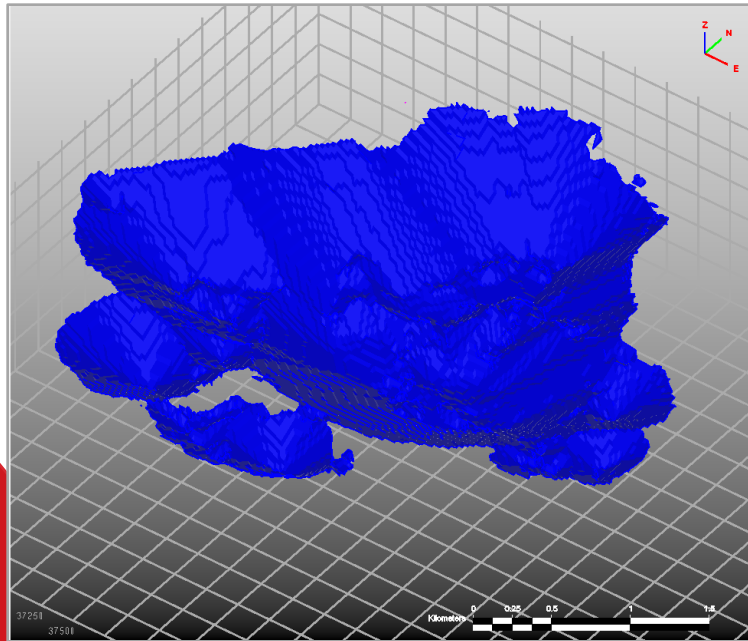
Marco Teórico

Proceso de Planeación Minera



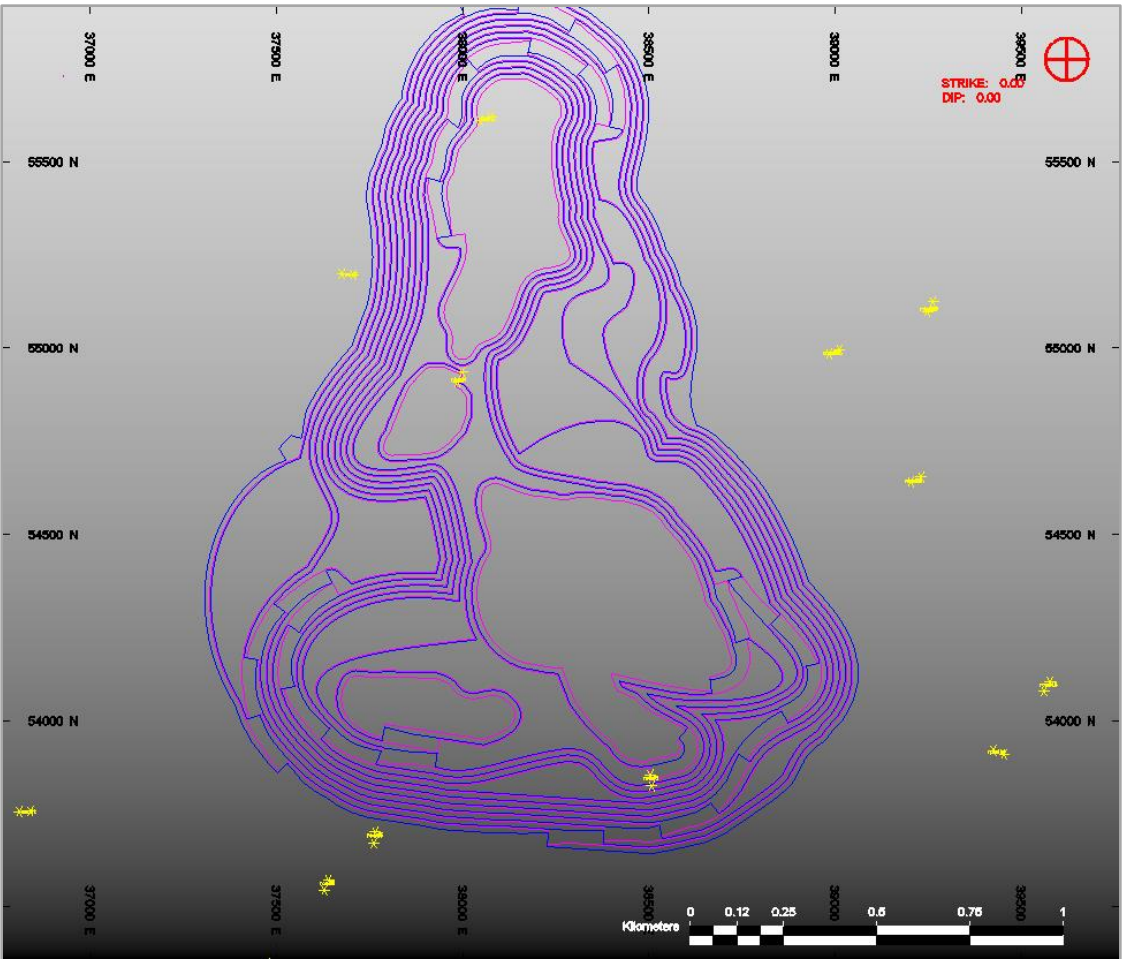
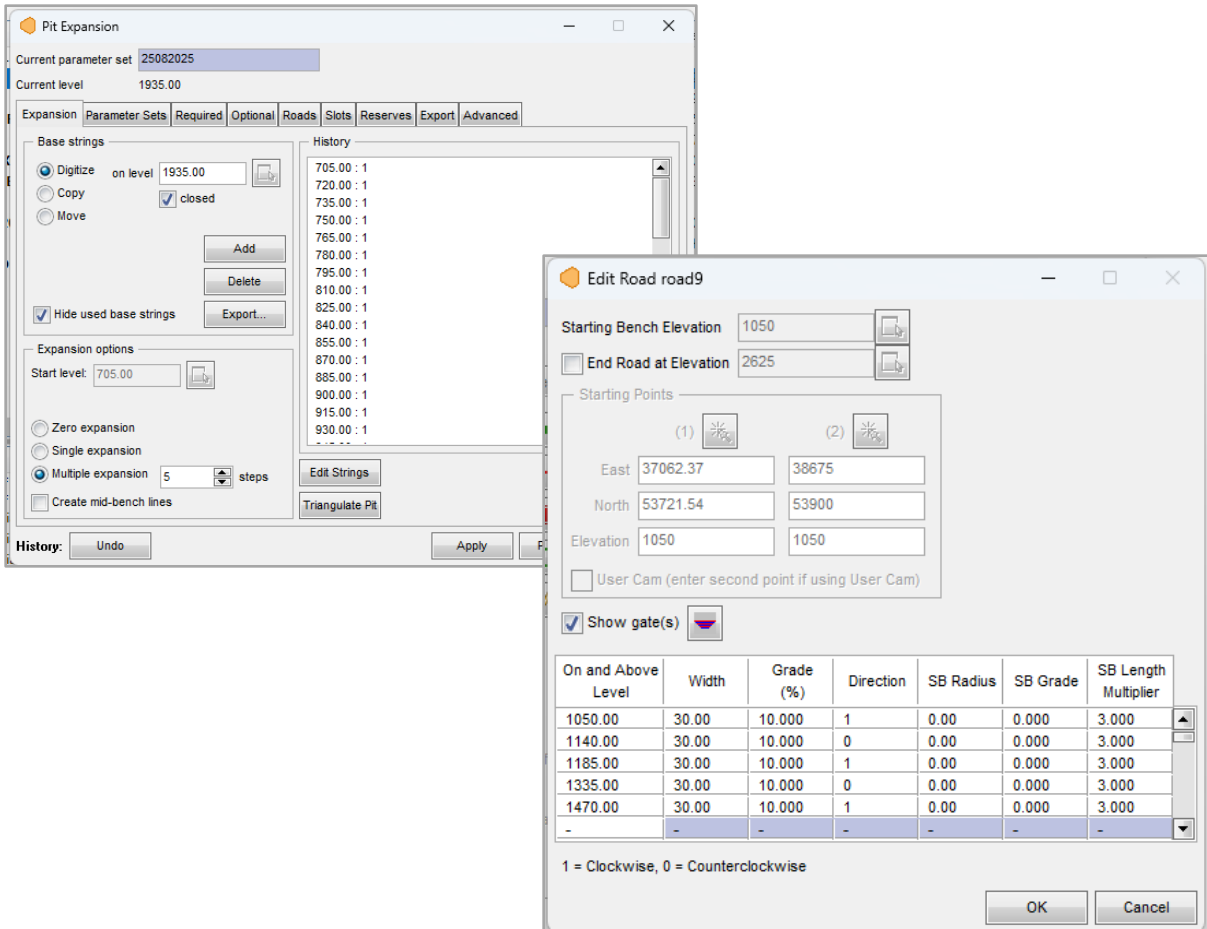
Metodología

- Pit Optimizado.
- Diseño de pit final con variación en la pendiente de las rampas.
- Simulación de extracción.
- Análisis estadístico de los resultados de la simulación.



Diseño de Pit

A través del uso de software en este caso MinePlan de la empresa Hexagon, se realizaron diseños de tajo final con ayuda de la herramienta Pit Expansion, la cual permite manipular las pendientes de las rampas así como ángulos de talud, anchos de banquetas entre otros mas.

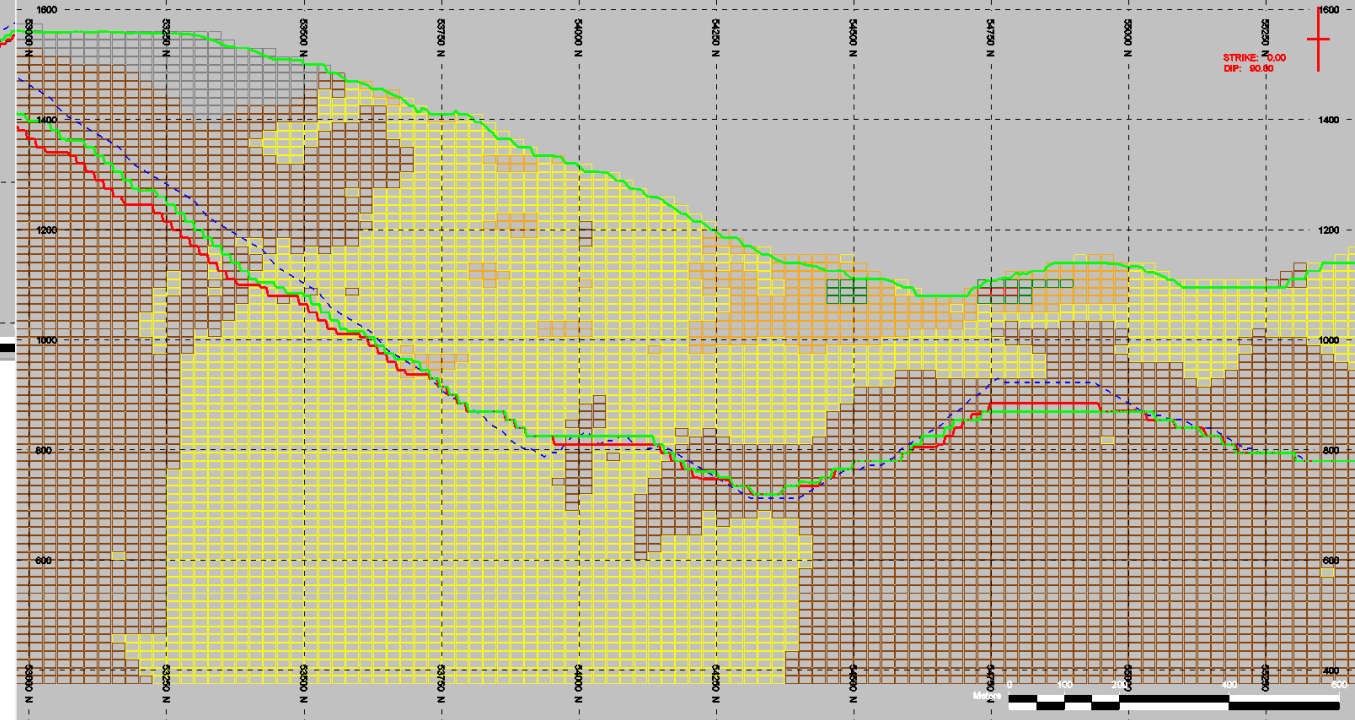
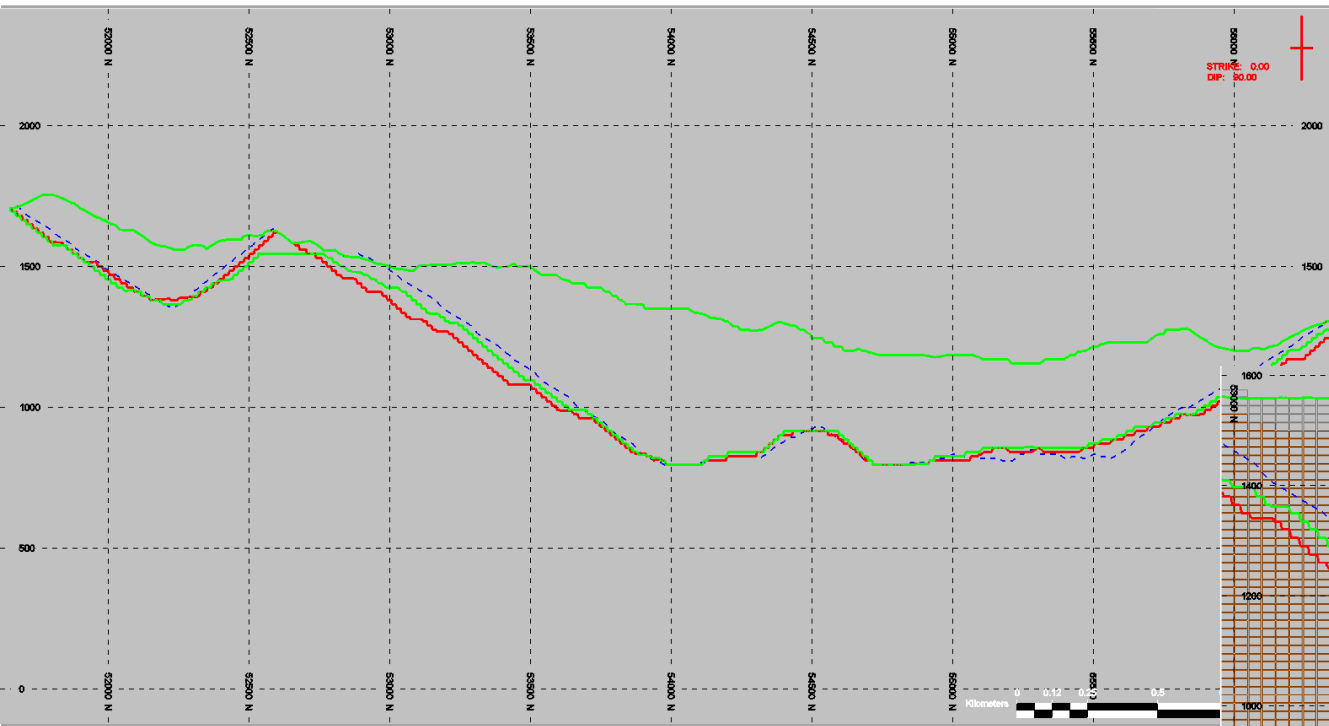


Simulación de extracción

Una vez que se definieron los diseños de los tajos finales con rampas del 8 y 10 %, se realiza la simulación de extracción, la cual nos arroja datos de movimiento de material así como leyes promedio de extracción y costos tanto de minado como de proceso.

Simbología:

- Pit Optimizado
- Diseño de tajo con pendientes al 8%
- Diseño de tajo con pendientes al 10%



Resultados

Se compararon resultados para determinar la relación entre pendiente, volumen minable y costos asociados.

	Mineral							Lixiviable			Movimiento Total						
	Tonnes	Cu	Mo	MC	PC	Mining_Cost	Processing_Cost	Tonnes	Cu	IS	Tonnes	Cu	Mo	MC	PC	Mining_Cost	Processing_Cost
Pit_Optimo	3,368,084,102	0.214	0.037	1.44	9.68	4,861,417,083	32,589,581,774	134,775,674	0.171	0.591	6,836,074,846	0.153	0.024	1.27	4.78	8,662,011,193	32,654,408,873
Pit_Design_8%	3,261,162,317	0.216	0.036	1.44	9.68	4,688,474,628	31,555,006,579	128,678,441	0.168	0.581	7,449,994,128	0.145	0.022	1.24	4.24	9,268,108,635	31,616,900,910
Pit_Design_10%	3,209,776,124	0.216	0.036	1.44	9.68	4,606,489,114	31,057,793,776	124,673,890	0.168	0.581	6,943,662,913	0.149	0.023	1.25	4.48	8,687,170,067	31,117,761,917
Dif-	51,386,193	0.207	0.038	0.003	0.000	81,985,514	497,212,804	4,004,551	0.173	0.566	506,331,214.51	0.094	0.013	-0.007	-0.238	580,938,568	499,138,993
Δ	-1.60%	0.06%	-0.08%	-0.18%	0.00%	-1.78%	-1.60%	-3.21%	-0.10%	0.08%	-7.29%	2.52%	2.87%	0.56%	5.30%	-6.69%	-1.60%

Comparativa entre las reservas de mineral y movimiento total de ambos diseños de tajo a 8 y 10%.

Análisis y Discusión

	Mineral							Lixiviable			Movimiento Total						
	Tonnes	Cu	Mo	MC	PC	Mining_Cost	Processing_Cost	Tonnes	Cu	IS	Tonnes	Cu	Mo	MC	PC	Mining_Cost	Processing_Cost
Dif-	51,386,193	0.207	0.038	0.003	0.000	81,985,514	497,212,804	4,004,551	0.173	0.566	506,331,214.51	0.094	0.013	-0.007	-0.238	580,938,568	499,138,993
Δ	-1.60%	0.06%	-0.08%	-0.18%	0.00%	-1.78%	-1.60%	-3.21%	-0.10%	0.08%	-7.29%	2.52%	2.87%	0.56%	5.30%	-6.69%	-1.60%

Toneladas de Contenido = (Ton · %Cu · Rec.)/100

Libras de Mineral = Toneladas de Contenido · Factor de conversión toneladas a libras

Valor del mineral = Libras de Mineral · Precio de Venta (\$/lb)

Contenido de Cobre = (51,386,193 Ton. · 0.207 %Cu · 0.85 Rec.)/100 = 90,467 Ton.

Libras de Cobre = 90,467 Ton. · 2204.62 lb/Ton = 199,445,741 lb

Valor del mineral = 199,445,741 lb · 3.30 (\$/lb) = **\$658,170,947**

Contenido de Molibdeno = (51,386,193 Ton. · 0.038 %Mo · 0.82 Rec.)/100 = 16,094 Ton.

Libras de Molibdeno = 16,094 Ton. · 2204.62 lb/Ton = 35,480,749 lb

Valor del mineral = 35,480,749 lb · 14.00 (\$/Lb) = **\$496,730,482**

Cátodo = ((4,004,551 Ton. · 0.173 %Cu · 0.566 I.S.) / 100) · 0.95 Rec. = 3,730 Ton.

Libras de Cobre = 3,730 Ton. · 2204.62 lb/Ton = 8,222,866 lb

Valor del mineral = 8,222,866 lb · 3.30 (\$/Lb) = **\$27,135,458**

Suma del Valor del mineral = **\$1,182,036,887**

Costo de Minado = **\$580,938,568**

Costo de proceso = **\$499,138,993**

Suma de los costos = **\$1,080,077,561**

Diferencia entre valor del mineral
menos costos = **\$101,959,326**

Conclusiones

- La pendiente de las rampas tiene un impacto directo en la cantidad de reservas totales minables, afectando la rentabilidad y sostenibilidad del proyecto minero.
- Existe un rango de pendientes que optimiza la recuperación de reservas sin comprometer la seguridad, recomendándose ajustar el diseño según las condiciones geotécnicas específicas.
- La modelación y simulación son herramientas clave para evaluar diferentes escenarios y tomar **decisiones informadas** en el diseño de rampas y tajo final.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro sincero agradecimiento a Grupo México, Unidad La Caridad, por su invaluable apoyo y colaboración en la recopilación de datos y asesoría técnica. En especial, agradecemos al ingeniero José Antonio Martínez Martínez, ex director de Operaciones, por su apoyo y dedicación en la elaboración de este estudio. También extendemos nuestro reconocimiento a todos los departamentos involucrados en el análisis y recopilación de información, como el Departamento de Geotecnia y su representante, el ingeniero Fernando Robles Coronado; el Departamento de Geología y su representante, Diana Feliciano Sandoval; y la Gerencia de Mina, representada por el ingeniero Blas Arturo Blanco Durón.

Asimismo, queremos dar un agradecimiento especial a la mesa directiva de la Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, A.C., Distrito 49 Nacozari, y en particular a su presidente, el ingeniero Manuel Alejandro Cordova Bracamonte, por su apoyo y colaboración.

Y un agradecimiento a todos los presentes por brindarme la oportunidad de estar aquí, frente a ustedes, para compartir parte de la experiencia que he adquirido en mis primeros años como profesional en el ámbito minero.

¡Gracias por su atención!

- Dora Elia Pérez Reyes – Jefa de Planeación a Largo Plazo Mina La Caridad – doraelia.perez@mm.gmexico.com
- Ana Patricia López Velazquez – Ingeniero Planeación Mina – ana.lopez@mm.gmexico.com