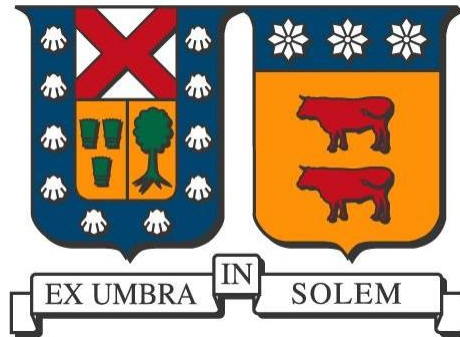


**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS, METALURGIA Y**  
**MATERIALES**



**Diseño de rampas en minería a cielo abierto usando heurística: Análisis de caso de estudio**

**Gonzalo Manuel Soto Striano**

Memoria de Título para optar al título profesional de Ingeniero Civil de Minas

Profesor Guía

Fabián Alejandro Manríquez León

Profesor Co-guía

Pierre Charles Nancel-Penard

2026

Santiago, Chile



## CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

### 1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción):  Memoria o trabajo de título  Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Diseño de rampas en minería a cielo abierto usando heurística: Analisis de caso de estudio

Nombre del candidato(a): Gonzalo Manuel Soto Striano

Carrera / Grado: Ingeniería Civil de Minas

Campus: San Joaquín Departamento: Departamento de Ingeniería de Minas, Metalurgia y Materiales

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Fabián Manríquez León, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

### 3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses  12 meses  2 años  3 años  5 años  10 años

#### Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

El trabajo podría contener información con potenciales implicancias de publicación en revistas académicas, de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad.

### 4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 18 de mayo del 2026

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 18 de mayo del 2026

Firma: 

*Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.*

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer primero a mi familia, por su apoyo incondicional, comprensión y confianza a lo largo de este proceso. Su respaldo fue fundamental para alcanzar este logro.

También agradecer a mis amigos, por el ánimo, las risas y el apoyo en los momentos más exigentes. Hicieron este camino mucho más llevadero.

A mi profesor guía, Fabián Manríquez, y co-guía, Pierre Nancel-Penard, por brindarme la oportunidad de desarrollar esta memoria, así como por su disposición, orientación y apoyo a lo largo de este proceso. Su experiencia y consejos fueron fundamentales.

Este trabajo fue parcialmente financiado por la ANID (Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo) mediante el Proyecto Fondecyt de Iniciación a la Investigación 2025 Folio 11250217.

## Resumen

El diseño de rampas en minería a cielo abierto es un componente crítico de la planificación minera, ya que influye directamente en la accesibilidad del rajo, el movimiento de estéril y la recuperación de reservas. Actualmente, este proceso se realiza de manera manual, lo que lo vuelve lento, dependiente de la experiencia del planificador y carente de criterios sistemáticos. Ante esta problemática, esta memoria propone el desarrollo y posterior validación de una metodología semiautomática para el diseño de rampas, que integre criterios geométricos y operacionales desde el inicio del proceso de planificación.

El objetivo del trabajo es evaluar técnica y económicamente el impacto de la incorporación y ajuste geométrico de rampas sobre un pit final optimizado sin rampas (UPIT), comparando los resultados obtenidos a partir de pits a soporte de bloques con rampas incorporadas y sus respectivos diseños suavizados mediante una metodología semiautomática. El análisis considera indicadores de tonelaje, beneficio económico y geometría del rajo, incluyendo ángulos globales e interrampa.

La metodología se aplica a dos casos de estudio con características geométricas distintas. En cada caso, el pit UPIT se utiliza como referencia, y se analizan las variaciones introducidas por la incorporación de rampas a soporte de bloques y por el posterior suavizado del diseño en Datamine OP.

Los resultados indican que, en el Caso de Estudio 1, el ajuste geométrico asociado al suavizado puede generar mejoras respecto del pit a soporte de bloques correspondiente, reflejadas en mayores tonelajes y beneficios, lo que evidencia la sensibilidad de los resultados al criterio de ajuste utilizado. En el Caso de Estudio 2, se observan reducciones más significativas de tonelaje y beneficio, asociadas a geometrías excesivamente delgadas en la base del pit a soporte de bloques, que no cumplen con anchos operacionales mínimos y condicionan el inicio del diseño suavizado a cotas superiores. Asimismo, en este caso se identifican ángulos interrampa elevados en los pits a soporte de bloques.

Se concluye que el impacto del diseño de rampas sobre el pit económico base depende fuertemente del criterio utilizado para ajustar el pit suavizado respecto de su pit a soporte de bloques, por lo que resulta fundamental definir criterios consistentes que permitan evaluar de manera objetiva las variaciones introducidas por el proceso de diseño.

## **Abstract**

The design of ramps in open pit mining is a critical component of mine planning, as it directly influences pit accessibility, waste movement, and reserve recovery. At present, this process is carried out manually, making it time-consuming, highly dependent on the planner's experience, and lacking systematic criteria. In response to this issue, this thesis proposes the development and subsequent validation of a semi-automatic methodology for ramp design that integrates geometric and operational criteria from the early stages of the planning process.

The objective of this work is to technically and economically evaluate the impact of ramp incorporation and geometric adjustment on an optimized final pit without ramps (UPIT), comparing the results obtained from block-supported pits with incorporated ramps and their corresponding smoothed designs generated through a semi-automatic methodology. The analysis considers tonnage, economic value, and pit geometry, including global and inter-ramp angles.

The methodology is applied to two case studies with different geometric characteristics. In each case, the UPIT is used as a reference, and the variations introduced by ramp incorporation in block-supported pits and by subsequent smoothing in Datamine OP are analyzed.

Results show that, in Case Study 1, the geometric adjustment associated with smoothing can improve the results obtained from the corresponding block-supported pit, leading to higher tonnage and economic value and highlighting the sensitivity of the results to the adjustment criteria used. In Case Study 2, more significant reductions in tonnage and economic value are observed, mainly associated with excessively narrow pit bottoms in the block-supported designs that do not meet minimum operational width requirements, forcing the smoothed design to start at higher elevations. Additionally, elevated inter-ramp angles are identified in the block-supported pits of this case.

It is concluded that the impact of ramp design on the economic pit base strongly depends on the criteria used to adjust the smoothed pit relative to its corresponding block-supported pit, making it essential to define consistent adjustment criteria to objectively assess the effects of the design process.

# Tabla de contenido

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1.    | Introducción.....                            | 13 |
| 1.1.  | Antecedentes generales.....                  | 13 |
| 1.2.  | Planteamiento del problema.....              | 14 |
| 1.3.  | Casos de estudio .....                       | 14 |
| 1.4.  | Hipótesis de trabajo .....                   | 14 |
| 1.5.  | Objetivos y alcances .....                   | 14 |
| 1.5.1 | Objetivo general.....                        | 14 |
| 1.5.2 | Objetivos específicos .....                  | 15 |
| 1.5.3 | Alcances .....                               | 15 |
| 2.    | Marco teórico.....                           | 16 |
| 2.1.  | Minería a cielo abierto.....                 | 16 |
| 2.2.  | Planificación y diseño minero .....          | 17 |
| 2.2.1 | Pit final y envolvente económica.....        | 18 |
| 2.2.2 | Leyes de corte .....                         | 19 |
| 2.3.  | Parámetros geométricos .....                 | 20 |
| 2.4.  | Software.....                                | 23 |
| 2.4.1 | Datamine OP .....                            | 23 |
| 2.5.  | Diseño de rampas minería cielo abierto ..... | 23 |
| 2.5.1 | Tipos de rampas .....                        | 23 |
| 2.5.2 | Metodología actual diseño de rampas.....     | 24 |
| 2.5.3 | Metodología asistida diseño de rampas .....  | 25 |
| 2.6.  | Ancho operacional .....                      | 27 |
| 2.7.  | Fases del pit.....                           | 28 |
| 3.    | Metodología propuesta .....                  | 29 |
| 4.    | Caso de estudio N°1 .....                    | 30 |
| 4.1.  | Descripción .....                            | 31 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 4.1.1 | Estadística básica .....                    | 31  |
| 4.1.2 | Selección de parámetros .....               | 33  |
| 4.2.  | Pit final .....                             | 33  |
| 4.3.  | Resultados .....                            | 37  |
| 4.3.1 | Best .....                                  | 37  |
| 4.3.2 | NorthPos.....                               | 43  |
| 4.3.3 | EastNeg.....                                | 48  |
| 4.3.4 | SouthPos .....                              | 53  |
| 4.3.5 | WestNeg.....                                | 58  |
| 4.4.  | Análisis de resultados .....                | 63  |
| 4.4.1 | Best .....                                  | 63  |
| 4.4.2 | NorthPos.....                               | 65  |
| 4.4.3 | EastNeg.....                                | 67  |
| 4.4.4 | SouthPos .....                              | 69  |
| 4.4.5 | WestNeg.....                                | 71  |
| 4.4.6 | Análisis conjunto caso de estudio N°1 ..... | 73  |
| 5.    | Caso estudio N° 2.....                      | 74  |
| 5.1.  | Pit final .....                             | 74  |
| 5.2.  | Resultados .....                            | 77  |
| 5.2.1 | Best .....                                  | 77  |
| 5.2.2 | NorthPos.....                               | 83  |
| 5.2.3 | EastNeg.....                                | 88  |
| 5.2.4 | SouthPos .....                              | 93  |
| 5.2.5 | WestNeg.....                                | 98  |
| 5.3.  | Análisis resultados .....                   | 103 |
| 5.3.1 | Best .....                                  | 103 |
| 5.3.2 | NorthPos.....                               | 105 |
| 5.3.3 | EastNeg.....                                | 107 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 5.3.4 | SouthPos .....                                       | 109 |
| 5.3.5 | WestNeg .....  | 111 |
| 5.3.6 | Análisis conjunto caso de estudio N°2 .....          | 113 |
| 6.    | Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro ..... | 114 |
| 6.1.  | Conclusiones .....                                   | 114 |
| 6.2.  | Recomendaciones .....                                | 115 |
| 6.3.  | Trabajo futuro .....                                 | 115 |
| 7.    | Referencias .....                                    | 116 |

## Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: Ejemplo de Mina cielo abierto .....   | 17 |
| Figura 2: Metodología proceso diseño mina.....  | 18 |
| Figura 3: Parámetros geométricos talud .....  | 22 |
| Figura 4: Tipos de rampa en minería a cielo abierto.....  | 23 |
| Figura 5: Visualización de parámetros en un cono.....   | 25 |
| Figura 6: Sectores mina cielo abierto .....   | 27 |
| Figura 7: Modelo de Bloques Marvin.....   | 30 |
| Figura 8: Vista planta pit final UPIT (A), Best (B), NorthPos (C), EastNeg (D), SouthPos (E) y WestNeg (F)..... | 34 |
| Figura 9: Vista Este pits finales .....   | 35 |
| Figura 10: Vista planta ajuste entre rampa y línea de puntos .....  | 38 |
| Figura 11: Vista este ajuste rampa y línea de puntos .....  | 38 |
| Figura 12: Diseño semiautomático de rampa suavizado, vista isométrica .....                                     | 39 |
| Figura 13: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte norte-sur.....                          | 39 |
| Figura 14: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte oeste-este. ....                        | 40 |
| Figura 15: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte norte-sur. ....              | 40 |
| Figura 16: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte oeste-este. ..               | 41 |
| Figura 17: Vista planta ajuste pit suavizado y línea se puntos.....   | 43 |
| Figura 18: Vista este ajuste pit suavizado y línea de puntos. ....  | 44 |
| Figura 19: Diseño semiautomático de rampa suavizado, vista isométrica .....                                     | 44 |
| Figura 20: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte norte-sur.....                          | 45 |
| Figura 21: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte oeste-este .....                        | 45 |
| Figura 22: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte norte-sur. ....              | 46 |
| Figura 23: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte oeste-este. ..               | 46 |
| Figura 24: Vista planta ajuste pit suavizado y línea de puntos. ....  | 48 |
| Figura 25: Vista este ajuste pit suavizado y línea de puntos. ....  | 49 |
| Figura 26: Diseño semiautomático de rampa suavizado, vista isométrica .....                                     | 49 |
| Figura 27: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte norte-sur.....                          | 50 |
| Figura 28: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte oeste-este. ....                        | 50 |
| Figura 29: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte norte-sur. ....              | 51 |
| Figura 30: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte oeste-este. ..               | 51 |
| Figura 31: Vista planta ajuste pit suavizado y línea de puntos. ....  | 53 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 32: Vista este ajuste pit suavizado y línea de puntos. ....  | 54 |
| Figura 33: Diseño semiautomático de rampa suavizado, vista isométrica. ....                                       | 54 |
| Figura 34: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte norte-sur. ....                           | 55 |
| Figura 35: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte norte-sur. ....                           | 55 |
| Figura 36: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte norte-sur. ....                | 56 |
| Figura 37: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte oeste-este. ..                 | 56 |
| Figura 38: Vista planta ajuste pit suavizado y línea de puntos. ....  | 58 |
| Figura 39: Vista este ajuste pit suavizado y línea de puntos. ....  | 59 |
| Figura 40: Diseño semiautomático de rampa suavizado, vista isométrica. ....                                       | 59 |
| Figura 41: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte norte-sur. ....                           | 60 |
| Figura 42: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte oeste-este. ....                          | 60 |
| Figura 43: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte norte-sur. ....                | 61 |
| Figura 44: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte oeste-este. ..                 | 61 |
| Figura 45: Vista planta pit final UPIT (A), Best (B), NorthPos (C), EastNeg (D), SouthPos (E) y WestNeg (F). .... | 74 |
| Figura 46: Vista este pit final UPIT (A), Best (B), NorthPos (C), EastNeg (D), SouthPos (E) y WestNeg (F). ....   | 75 |
| Figura 47: Vista planta ajuste pit suavizado y línea de puntos. ....  | 78 |
| Figura 48: Vista este ajuste pit suavizado y línea de puntos. ....  | 78 |
| Figura 49: Diseño semiautomático de rampa suavizado, vista isométrica. ....                                       | 79 |
| Figura 50: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte norte-sur. ....                           | 79 |
| Figura 51: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte oeste-este. ....                          | 80 |
| Figura 52: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte norte-sur. ....                | 80 |
| Figura 53: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte oeste-este. ..                 | 81 |
| Figura 54: Vista planta ajuste pit suavizado y línea de puntos. ....  | 83 |
| Figura 55: Vista este ajuste pit suavizado y línea de puntos. ....  | 84 |
| Figura 56: Diseño semiautomático de rampa suavizado, vista isométrica. ....                                       | 84 |
| Figura 57: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte norte-sur. ....                           | 85 |
| Figura 58: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte oeste-este. ....                          | 85 |
| Figura 59: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte norte-sur. ....                | 86 |
| Figura 60: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte norte-sur. ....                | 86 |
| Figura 61: Vista planta ajuste pit suavizado y línea de puntos. ....  | 88 |
| Figura 62: Vista este ajuste pit suavizado y línea de puntos. ....  | 89 |
| Figura 63: Diseño semiautomático de rampa suavizado, vista isométrica. ....                                       | 89 |
| Figura 64: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte norte-sur. ....                           | 90 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 65: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte oeste-este. ....           | 90  |
| Figura 66: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte norte-sur. .... | 91  |
| Figura 67: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte oeste-este. ..  | 91  |
| Figura 68: Vista planta ajuste pit suavizado y línea de puntos. ....                               | 93  |
| Figura 69: Vista este ajuste pit suavizado y línea de puntos. ....                                 | 94  |
| Figura 70: Diseño semiautomático de rampa suavizado, vista isométrica. ....                        | 94  |
| Figura 71: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte norte-sur. ....            | 95  |
| Figura 72: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte oeste-este. ....           | 95  |
| Figura 73: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte norte-sur. .... | 96  |
| Figura 74: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte oeste-este. ..  | 96  |
| Figura 75: Vista planta ajuste pit suavizado y línea de puntos. ....                               | 98  |
| Figura 76: Vista planta ajuste pit suavizado y línea de puntos. ....                               | 99  |
| Figura 77: Diseño semiautomático de rampa suavizado, vista isométrica. ....                        | 99  |
| Figura 78: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte oeste-este. ....           | 100 |
| Figura 79: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte oeste-este. ....           | 100 |
| Figura 80: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte norte-sur. ...  | 101 |
| Figura 81: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte oeste-este. ... | 101 |

## Índice de tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1: Características modelo de bloques Marvin. ....                                     | 30 |
| Tabla 2: Estadísticas básicas para ley de cobre en caso de estudio N°1 .....                | 31 |
| Tabla 3: Estadísticas básicas para ley de oro en caso de estudio N°1 .....                  | 31 |
| Tabla 4: Estadísticas básicas para ley equivalente en caso de estudio N°1 .....             | 31 |
| Tabla 5: Parámetros económicos del caso de estudio. ....                                    | 33 |
| Tabla 6: Leyes y reservas pits finales. ....  | 34 |
| Tabla 7: Ángulos globales pit finales caso de estudio N°1 .....                             | 36 |
| Tabla 8: Cubicaciones pits finales caso de estudio N°1 .....                                | 36 |
| Tabla 9: Parámetros geométricos Best. ....  | 37 |
| Tabla 10: Ángulo caras diseño Best semiautomático. ....                                     | 41 |
| Tabla 11: Cubicación diseño Best semiautomático. ....                                       | 42 |
| Tabla 12: Parámetros geométricos NorthPos. ....   | 43 |
| Tabla 13: Ángulo caras diseño NorthPos semiautomático. ....                                 | 47 |
| Tabla 14: Cubicación diseño NorthPos semiautomático. ....                                   | 47 |
| Tabla 15: Parámetros geométricos EastNeg .....  | 48 |
| Tabla 16: Ángulo caras diseño EastNeg semiautomático. ....                                  | 52 |
| Tabla 17: Cubicación diseño EastNeg semiautomático. ....                                    | 52 |
| Tabla 18: Parámetros geométricos SouthPos. ....   | 53 |
| Tabla 19: Ángulo caras diseño SouthPos semiautomático .....                                 | 57 |
| Tabla 20: Cubicación diseño SouthPos semiautomático .....                                   | 57 |
| Tabla 21: Parámetros geométricos WestNeg. ....  | 58 |
| Tabla 22: Ángulo caras diseño WestNeg semiautomático. ....                                  | 62 |
| Tabla 23: Cubicación diseño WestNeg semiautomático. ....                                    | 62 |
| Tabla 24: Comparación de tonelaje entre pits finales y diseño semiautomático. ....          | 63 |
| Tabla 25: Comparación de beneficio entre pits finales y diseño semiautomático. ....         | 64 |
| Tabla 26: Comparación entre ángulos pits finales, diseño semiautomático y teóricos. ....    | 64 |
| Tabla 27: Comparación de tonelaje entre pits finales y diseño semiautomático. ....          | 65 |
| Tabla 28: Comparación de beneficio entre pits finales y diseños semiautomático. ....        | 66 |
| Tabla 29: Comparación de ángulos entre pits finales, diseño semiautomático y teóricos. .... | 66 |
| Tabla 30: Comparación de tonelaje entre pits finales y diseño semiautomático. ....          | 67 |
| Tabla 31: Comparación de beneficio entre pits finales y diseños semiautomático. ....        | 68 |
| Tabla 32: Comparación de ángulos entres pit finales, diseño semiautomático y teórico. ....  | 68 |
| Tabla 33: Comparación de tonelaje entre pits finales y diseño semiautomático. ....          | 69 |
| Tabla 34: Comparación de beneficio entre pits finales y diseños semiautomático. ....        | 70 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 35: Comparación de ángulos entre pits finales, diseño semiautomático y teóricos. ....    | 70  |
| Tabla 36: Comparación de tonelaje entre pits finales y diseño semiautomático. ....             | 71  |
| Tabla 37: Comparación de beneficio entre pits finales y diseño semiautomático. ....            | 72  |
| Tabla 38: Comparación de ángulos entre pits finales, diseño semiautomático y teóricos. ....    | 72  |
| Tabla 39: Características modelo de bloques Zuck_medium. ....                                  | 74  |
| Tabla 40: Ángulos globales pit finales caso de estudio N°2. ....                               | 76  |
| Tabla 41: Cubicaciones pits finales caso de estudio N°2. ....                                  | 76  |
| Tabla 42: Parámetros geométricos Best. ....  | 77  |
| Tabla 43: Ángulo caras diseño Best semiautomático. ....  | 81  |
| Tabla 44: Cubicación diseño Best semiautomático. ....  | 82  |
| Tabla 45: Parámetros geométricos NorthPos. ....  | 83  |
| Tabla 46: Ángulo caras diseño NorthPos semiautomático. ....                                    | 87  |
| Tabla 47: Cubicación diseño NorthPos semiautomático. ....                                      | 87  |
| Tabla 48: Parámetros geométricos EastNeg. ....   | 88  |
| Tabla 49: Ángulo caras diseño EastNeg semiautomático. ....                                     | 92  |
| Tabla 50: Cubicación diseño EastNeg semiautomático. ....                                       | 92  |
| Tabla 51: Parámetros geométricos SouthPos. ....  | 93  |
| Tabla 52: Ángulo caras diseño SouthPos semiautomático. ....                                    | 97  |
| Tabla 53: Cubicación diseño SouthPos semiautomático. ....                                      | 97  |
| Tabla 54: Parámetros geométricos WestNeg. ....   | 98  |
| Tabla 55: Ángulo caras diseño WestNeg semiautomático. ....                                     | 102 |
| Tabla 56: Cubicación diseño WestNeg semiautomático. ....                                       | 102 |
| Tabla 57: Comparación de tonelaje y beneficio entre pits finales y diseño semiautomático. .... | 103 |
| Tabla 58: Comparación de ángulos entre pits finales, diseño semiautomático y teóricos. ....    | 104 |
| Tabla 59: Comparación de tonelaje y beneficio entre pits finales y diseño semiautomático. .... | 105 |
| Tabla 60: Comparación de ángulos entre pits finales, diseño semiautomático y teóricos. ....    | 106 |
| Tabla 61: Comparación de tonelaje y beneficio entre pits finales y diseño semiautomático. .... | 107 |
| Tabla 62: Comparación de ángulos entre pits finales, diseño semiautomático y teóricos. ....    | 108 |
| Tabla 63: Comparación de tonelaje y beneficio entre pits finales y diseño semiautomático. .... | 109 |
| Tabla 64: Comparación de ángulos entre pits finales, diseño semiautomático y teóricos. ....    | 110 |
| Tabla 65: Comparación de tonelaje y beneficio entre pits finales y diseño semiautomático. .... | 111 |
| Tabla 66: Comparación de ángulos entre pits finales, diseño semiautomático y teóricos. ....    | 112 |

# 1. Introducción

## 1.1. Antecedentes generales

La planificación minera es el proceso sistemático mediante el cual se define la secuencia temporal y espacial de extracción de un yacimiento, integrando información geológica, geotécnica, económica y operacional, con el objetivo de maximizar el valor del proyecto minero y asegurar su viabilidad técnica, económica y operativa dentro de un marco de restricciones físicas, ambientales y productivas ([Hustrulid et al., 2013](#)).

En la planificación de minas a cielo abierto, el diseño de caminos representa un aspecto crítico que debe ser considerado desde las etapas iniciales del proceso. Su inclusión temprana es fundamental, ya que puede afectar significativamente los ángulos de talud definidos, los cuales, a su vez, influyen directamente en la cantidad de reservas recuperables. Si los caminos no se contemplan adecuadamente en los modelos preliminares, su incorporación posterior puede generar sobreexcavación no planificada o incluso la pérdida de reservas previamente consideradas explotables. Por otro lado, adoptar ángulos de talud más conservadores desde un inicio para anticipar el espacio requerido por las rampas podría resultar en un aumento innecesario del estéril extraído ([Hustrulid et al., 2013](#)).

Actualmente, el diseño operativo de fases en minería a cielo abierto es un proceso altamente demandante en tiempo y experiencia, considerado un arte dentro de la industria. Este trabajo se realiza de forma iterativa, evaluando múltiples escenarios mediante ensayo y error hasta alcanzar una configuración operativa aceptable. Así, el planificador depende en gran medida de su criterio profesional, dedicando una cantidad significativa de tiempo al desarrollo del diseño, sin tener certeza de que dicho resultado represente una solución económicamente óptima para la envolvente final del pit ([Sanhueza, 2018](#)).

Por esta razón, se está desarrollando un modelo matemático para ayudar al planificador a encontrar el mejor diseño de rampa posible. Este modelo busca determinar un camino óptimo considerando parámetros operacionales y económicos. Busca que la velocidad computacional permita evaluar distintos escenarios antes de seleccionar uno final. El modelo comienza desde un modelo valorizado y un pit definido y busca un recorrido que cumpla con las condiciones geotécnicas. Este enfoque representa los primeros pasos hacia formulaciones cada vez más complejas que busca integrar más condiciones y que en el largo plazo permita automatizar completamente el proceso de planificación estratégica y diseño de minas a cielo abierto ([Nancel-Penard et al., 2019](#)).

## **1.2. Planteamiento del problema**

En el diseño de minas a cielo abierto, la buena construcción de las rampas es fundamental para poder garantizar una correcta accesibilidad y buscar la mayor eficiencia del transporte. No obstante, este proceso por lo general se realiza de manera manual y bajo un método poco sistemático, lo que se termina traduciendo en caminos poco eficientes, que a su vez significa movimiento de estéril mayor al necesario y problemas de conectividad entre fases. Esta ausencia de metodología para la resolución de este problema, se traduce en la falta de integración de una serie de parámetros como ángulos globales, conexiones interfases y restricciones geométricas, limitando así la posibilidad de optimizar el diseño, afectando así a la recuperación de reservas y aumento de costos operacionales.

## **1.3. Casos de estudio**

Como forma de desarrollar y validar el método propuesto, se utilizarán dos casos de estudio, definidos a partir de modelos de bloques distintos, correspondientes a yacimientos explotados mediante minería a cielo abierto. En ambos casos se considerarán anchos operacionales reales y diferentes configuraciones de rampas, con distintas direcciones de origen. El diseño se abordará mediante pits monofase a soporte de bloques, con el objetivo de representar condiciones operacionales realistas. La diversidad de escenarios analizados permitirá generar un volumen de resultados comparable en términos geométricos, operacionales y de eficiencia, evaluando su impacto en la conectividad del pit, la accesibilidad, la recuperación de reservas y el movimiento de estéril.

## **1.4. Hipótesis de trabajo**

La implementación de un diseño semiautomático de rampas mejora la eficiencia del proceso, permitiendo reducir el material de estéril extraído, aumentando el beneficio y optimizar el acceso a fases operativas, en comparación con métodos manuales tradicionales.

## **1.5. Objetivos y alcances**

### **1.5.1 Objetivo general**

El objetivo del trabajo es evaluar técnica y económicamente el impacto de la incorporación y ajuste geométrico de rampas sobre un pit final optimizado sin rampas (UPIT), comparando los resultados obtenidos a partir de pits a soporte de bloques con rampas incorporadas y sus respectivos diseños

suavizados mediante una metodología semiautomática. El análisis considera indicadores de tonelaje, beneficio económico y geometría del rajo, incluyendo ángulos globales e interrampa.

### **1.5.2 Objetivos específicos**

- Diseñar rampas mediante la metodología semiautomática.
- Comparar y evaluar los diferentes casos de estudio de los diferentes modelos de bloques.
- Analizar indicadores técnicos y económicos como tonelaje, beneficio y geometría del rajo.
- Validar la metodología semiautomática frente a los métodos manuales tradicionales, destacando ventajas y limitaciones.

### **1.5.3 Alcances**

- Esta memoria está orientada exclusivamente al diseño de rampas en minería a cielo abierto.
- El estudio se basa en modelos de bloques de prueba y no se consideran datos reales ni restricciones geotécnicas específicas.
- Se van a considerar los parámetros económicos como conocidos y constantes.
- Todos los diseños serán realizados únicamente para el pit final, no se consideran fases de extracción ni su secuencia temporal.
- Para la construcción de las rampas se usará el software Data Mine OP, aplicando la metodología semiautomática propuesta.

## 2. Marco teórico

### 2.1. Minería a cielo abierto

La planificación minera constituye un proceso integral orientado a guiar las decisiones de una empresa en torno al aprovechamiento eficiente de los recursos, incorporando tanto factores internos como externos. Se clasifica en planificación estratégica, administrativa y operativa, cada una con objetivos y alcances específicos, y se desarrolla mediante etapas de análisis, formulación de objetivos y toma de decisiones. Su estructura abarca distintos horizontes temporales, es decir, largo, mediano y corto plazo, que permiten proyectar la sostenibilidad futura de la explotación y, a la vez, optimizar la gestión de las operaciones inmediatas. Asimismo, se distingue entre planificación conceptual y operacional, ambas vinculadas a la maximización de la recuperación del yacimiento, la permanencia del negocio minero y el incremento del valor actualizado neto ([Herbert, 2018](#)).

La minería a cielo abierto es una técnica de extracción aplicable cuando los yacimientos minerales se encuentran próximos a la superficie terrestre. Este método se caracteriza por permitir una alta tasa de producción en comparación con la minería subterránea, lo que lo convierte en una opción eficiente para grandes volúmenes de material.

El diseño y la forma del rajo pueden variar según el tipo de recurso extraído. Por ejemplo, en el caso de arenas y gravas, se suelen utilizar canteras superficiales; en la minería del carbón, predominan rajos extensos, pero poco profundos; mientras que los depósitos de metales como el cobre, generalmente se asocian a minas de gran profundidad.

Antes de iniciar la extracción del mineral, es necesario remover el material estéril que lo recubre. En este contexto, las rampas cumplen un rol fundamental al permitir el acceso de los equipos y el transporte del material desde el fondo del rajo hacia la superficie. La operación de extracción se lleva a cabo a través de bancos escalonados, que definen la geometría progresiva de la mina ([Newman, 2010](#)).



*Figura 1: Ejemplo de Mina cielo abierto*

## **2.2. Planificación y diseño minero**

La planificación minera es un proceso sistemático y continuo que integra diversas disciplinas vinculadas a la actividad minera, con el objetivo de convertir un recurso mineral en un proyecto productivo optimizado desde el punto de vista técnico y económico ([Troncoso, 2017](#)). Esta planificación abarca desde la evaluación del recurso hasta la proyección de escenarios que maximicen el valor del negocio.

En paralelo, el diseño minero se enfoca en definir las condiciones operativas de la futura explotación. Esto incluye la localización estratégica de rampas de acceso, la configuración de zonas de trabajo, el diseño de botaderos, la determinación de la capacidad y tipo de equipos, así como la planificación de infraestructura auxiliar, entre otros aspectos clave.

Ambos procesos, es decir, planificación y diseño están estrechamente vinculados, ya que la planificación entrega las bases para evaluar alternativas estratégicas, mientras que el diseño traduce estas decisiones en soluciones técnicas viables. En conjunto, permiten seleccionar la alternativa que representa el mejor balance entre retorno económico y cumplimiento de restricciones técnicas, legales, sociales y ambientales. Una visión general de este proceso convencional puede verse en la Figura 2 ([Troncoso, 2016](#)).

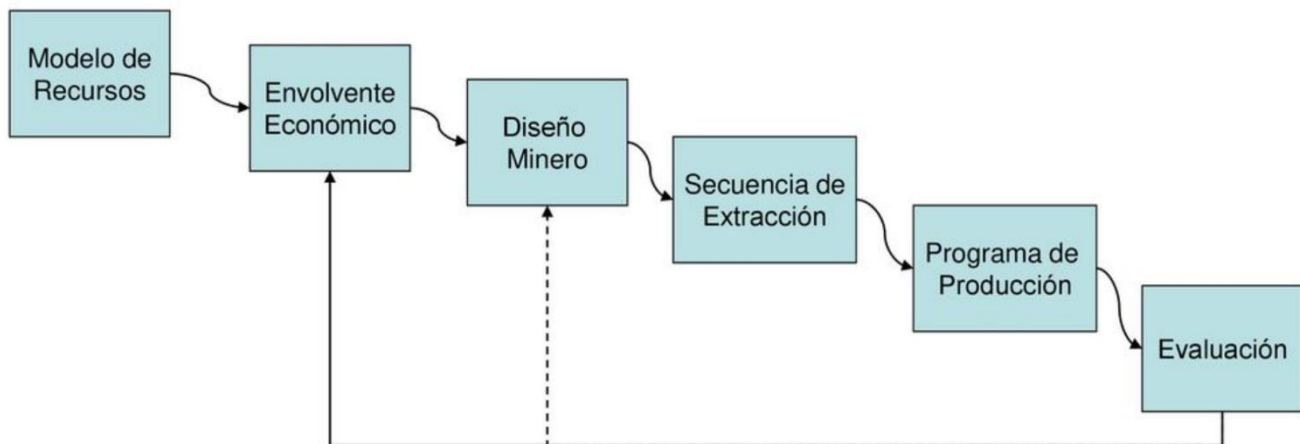


Figura 2: Metodología proceso diseño mina

### 2.2.1 Pit final y envolvente económica

El pit final corresponde al límite máximo teórico del rajo que se obtendría al extraer todo el material económicamente explotable bajo un conjunto de restricciones técnicas y económicas. Esta envolvente define la forma definitiva que tendría la mina al finalizar su vida útil, y sirve como base para la planificación de largo plazo, ya que delimita el volumen total de mineral y estéril a remover. Además, establece el espacio dentro del cual deben ubicarse instalaciones clave como plantas de procesamiento, botaderos y accesos, considerando que estas deberán mantenerse operativas durante toda la explotación. El diseño del pit final debe respetar parámetros como el ángulo de talud global y la conectividad de las rampas, asegurando la estabilidad física de la mina y la continuidad operativa del proyecto (Vargas, 2014).

La definición del pit final está directamente influenciada por la estrategia global de la empresa minera, la cual puede orientarse hacia la maximización del Valor Actual Neto del proyecto, la maximización del volumen de reservas recuperables o la reducción de la exposición a riesgos económicos durante la operación (Sanhueza, 2018).

### 2.2.2 Leyes de corte

La ley de corte es el criterio empleado normalmente en minería para discriminar entre mineral y estéril. La determinación de la ley de corte depende de factores económicos: precio de los metales, costo mina, flete, costos fijos, tasa de interés, etc., y de factores metalúrgicos: tipo de producto, proceso, capacidad, recuperación, impurezas, subproductos, etc. ([Alfaro, 2009](#))

La ley de corte crítica se obtiene al igualar los ingresos que se pueden obtener al procesar una tonelada de mineral con todos los costos requeridos para procesar dicho mineral. La forma para calcularlo se puede ver en la Ecuación (1).

$$LCC = \frac{C_M + C_P}{(P - C_V) \cdot R \cdot f} \quad (1)$$

Donde LCC es la ley de corte crítica,  $C_M$  es el costo mina (USD/t),  $C_P$  es el costo planta (USD/t),  $P$  es el precio del cobre (USD/lb),  $C_V$  es el costo venta (USD/lb),  $R$  es la recuperación metalúrgica (%) y  $f$  es el factor de conversión de la unidad de venta a la unidad de extracción (lb/t).

La ley de corte marginal corresponde al valor de la ley marginal, pero sin el costo de mina, dado que corresponde a un gasto ya incurrido y se debe tomar la decisión de enviarlo a planta o a botadero de lastre, se considera como un costo fijo. La forma para calcularlo está representada por la Ecuación (2).

$$LCM = \frac{C_P}{(P - C_V) \cdot R \cdot f} \quad (2)$$

Donde LCM es la ley de corte marginal,  $C_P$  es el costo planta (USD/t),  $P$  es el precio del cobre (USD/lb),  $C_V$  es el costo venta (USD/lb),  $R$  es la recuperación metalúrgica (%) y  $f$  es el factor de conversión de la unidad de venta a la unidad de extracción (lb/t).

### 2.3. Parámetros geométricos

Los parámetros geométricos del rajo y su configuración definen la forma física que este tendrá y son de gran importancia para garantizar su operatividad y estabilidad. Estos parámetros tienen en cuenta elementos como la inclinación de los taludes, la altura de bancos y el diseño de rampas, los cuales deben cumplir criterios técnicos, geomecánicos y operacionales para optimizar la seguridad y eficiencia del proyecto. A continuación, se definen los componentes más importantes en el diseño de una mina a cielo abierto ([Hustrulid et al., 2013](#)) ([Wetherelt y Wielen, 2011](#)):

- **Altura de banco:** Cada banco posee una superficie superior e inferior separados por una distancia  $h$ , esta distancia corresponde a la altura del banco. Esta se elige en función de los equipos de operación seleccionados y la selectividad que se desea, los bancos pueden variar generalmente entre los 5 m a 15 m.
- **Ángulo cara banco:** Es el ángulo comprendido entre la pata y la cresta de un banco con respecto a la horizontal. Puede variar considerablemente dependiendo de la calidad de la roca y sus características. Generalmente varía entre  $55^\circ$  a  $90^\circ$ . Este ángulo viene dado por la Ecuación (3):

$$\tan(\alpha) = \frac{h_b}{\tan(\beta) + b} \quad ( 3 )$$

Donde el alfa ( $\alpha$ ) es el ángulo cara banco en grados,  $h_b$  es la altura del banco en metros,  $\beta$  es el ángulo interrampa en grados y  $b$  es el ancho de la berma en metros.

- **Ancho de berma:** La berma cumple la función de contener cualquier desprendimiento de material o caída de rocas de bancos superiores. Una fórmula empírica para el cálculo de ancho de bermas dada una altura de banco fue propuesta por Ritchie (1963) y luego modificada por Richard Call (1986) (Storey, 2010) se muestra en la Ecuación (4).

$$\text{AnchoBerma} = (0.2 \cdot \text{AlturaBanco} + 4.5) \quad ( 4 )$$

- **Ancho de rampa:** Su ancho dependerá netamente de los equipos que transitarán por ella, considerando una distancia de seguridad asociada y un ancho para el drenaje de la mina. El cálculo que define este ancho viene dado por la Ecuación (5).

$$A_r = 4 \left( \frac{A}{2} \right) + 2A + 2B \quad ( 5 )$$

Donde A es el ancho del equipo más grande en metros,  $A_r$  es el ancho de la rampa en metros y B es el ancho de los pretilos en la base en metros.

- **Altura global:** Corresponde a la altura proyectada en la vertical entre la pata del banco más profundo y la cresta del banco que interseca con la superficie.
- **Ángulo global:** Se mide como el ángulo entre la pata del banco más profundo y la cresta del banco que interseca con la superficie. Valores típicos varían entre 40° a 50°. El ángulo global del talud se obtiene mediante la Ecuación (6).

$$\tan \theta = \frac{L_y}{L_x} \quad ( 6 )$$

Donde  $\theta$  es el ángulo global del talud en grados,  $L_y$  es la distancia vertical en metros desde la pata del banco más profundo hasta la cresta del banco que intercepta la superficie de la topografía y  $L_x$  es la distancia horizontal en metros proyectada hasta la cresta del banco más superficial.

- **Ángulo interrampa:** Corresponde a la inclinación medida entre la pata del banco inferior y la pata del banco superior, para el segmento de bancos contenidos entre rampas en una pared del rajo. Este ángulo se obtiene mediante la Ecuación (7).

$$\tan(\beta) = \frac{h_b}{Q} \quad ( 7 )$$

Donde  $\beta$  es el ángulo interrampa en grados,  $h_b$  es la altura del banco en metros, y  $Q$  es la distancia en metros que existe entre la cresta de la rampa y la proyección del ángulo interrampa medido desde la rampa inferior.

- **Rampas:** Es el camino en pendiente que permite el tránsito de equipos desde la superficie a los diferentes bancos en extracción. Puede permitir la circulación de camiones en ambos sentidos ([Sanhueza, 2018](#)).
- **Bancos:** Cada banco corresponde a uno de los horizontes mediante los cuales se extrae el mineral. El banco se va cortando por el horizonte inferior, es decir hacia abajo, generando una superficie escalonada o pared del rajo ([Sanhueza, 2018](#)).
- **Berma:** Es la franja de la cara horizontal de un banco, como un borde, que se deja especialmente para detener los derrames de material que se puedan producir al interior del rajo ([Sanhueza, 2018](#)).

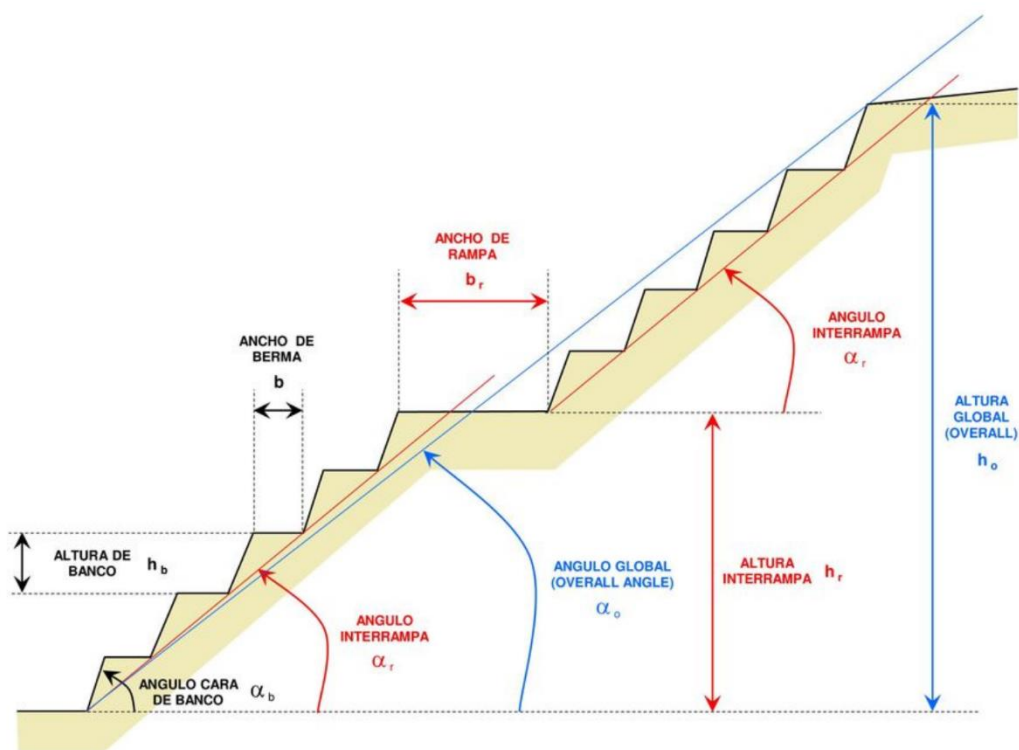


Figura 3: Parámetros geométricos talud

## 2.4. Software

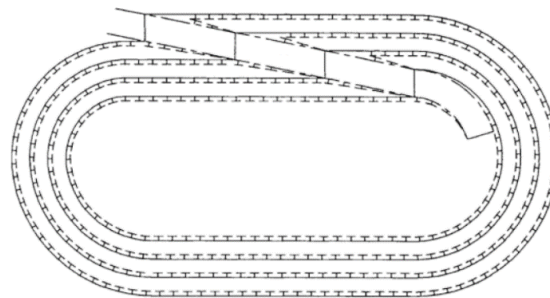
### 2.4.1 Datamine OP

Studio OP es un producto completo de diseño y programación para la planificación a corto y mediano plazo de minas a cielo abierto. Cuenta con varias funciones para la generación automatizada de reservas, el diseño y la programación de rajas, Studio OP busca que generar y comparar planes mineros alternativos sea más simple para el planificador ([Datamine, 2025](#)).

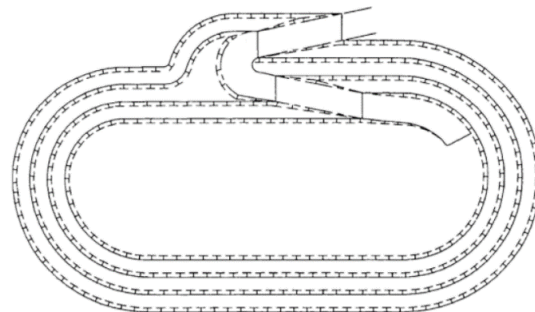
## 2.5. Diseño de rampas minería cielo abierto

### 2.5.1 Tipos de rampas

En minería a cielo abierto, el diseño del trazado de las rampas es clave para asegurar una conexión eficiente entre los distintos niveles del pit. Existen dos tipos de rampas, las cuales son tipo espiral y tipo switchback, cada una con características, ventajas y limitaciones particulares que se adaptan a distintas geometrías del rajo y condiciones operacionales ([Hustrulid et al., 2013](#)).



(a) Espiral



(b) Switchback

Figura 4: Tipos de rampa en minería a cielo abierto

Ambas soluciones permiten el acceso progresivo a distintos niveles del rajo, adaptándose a la geometría del depósito y a las restricciones del terreno. Sin embargo, el uso de switchbacks debe evitarse en la medida de lo posible ([Couzens 1979](#)), ya que presentan desventajas operacionales significativas como:

- Una mayor dificultad de maniobra
- Mayor desgaste de neumáticos
- Aumento en los requerimientos de mantenimiento
- Riesgos de seguridad asociados a la visibilidad y al manejo en curvas cerradas.

A pesar de ello, existen condiciones particulares en las que los switchbacks pueden ser una alternativa viable, como cuando la geometría del depósito permite su implementación sin incurrir en grandes volúmenes de sobreexcavación o cuando se ubican en el lado con un ángulo menor del pit, evitando así un exceso de remoción de material estéril en el lado con un ángulo más alto. En esos casos, su uso puede representar tanto accesibilidad como eficiencia ([Hustrulid et al., 2013](#)).

## **2.5.2 Metodología actual diseño de rampas**

La metodología actual del diseño de rampas en minería a cielo abierto se basa mayoritariamente en un proceso manual que, si bien puede ser asistido por software tipo CAD, exige una significativa carga de trabajo, experiencia técnica y disponibilidad de información. Este proceso parte desde las envolventes económicas generadas por algoritmos de optimización, las cuales deben ser transformadas en fases operativas extraíbles mediante la incorporación de rampas y espacios operacionales. Sin embargo, los algoritmos utilizados comúnmente no consideran directamente estos elementos de diseño, lo que genera una desconexión entre el plan minero teórico y el diseño práctico. Como resultado, el diseño de rampas es una tarea compleja, costosa en tiempo y con escasas oportunidades de evaluar múltiples configuraciones, lo que hace que la calidad del resultado final dependa en gran medida de la experiencia del ingeniero y del tiempo disponible para el modelado ([Díaz, 2017](#)).

El procedimiento como tal comienza una vez se establece que el yacimiento contiene material con valor económico y es viable de explotar mediante minería a cielo abierto, el siguiente paso es definir tanto el diseño del pit como su correspondiente plan de producción. Este proceso requiere un enfoque iterativo de prueba y error hasta alcanzar una configuración que se ajuste de manera coherente al plan minero proyectado. Para ello, se realiza inicialmente una discretización del yacimiento a través de un modelo de bloques, en el cual cada bloque contiene atributos específicos como tonelaje, ley del mineral,

volumen y otras propiedades relevantes. Luego, estos bloques son evaluados económicamente en función de parámetros técnico-económicos tales como los precios de los metales, costos operacionales y factores de recuperación. Posteriormente, se lleva a cabo la resolución del problema del pit final y de los pits anidados mediante técnicas de optimización como el algoritmo de Lerchs y Grossmann (1965) con el objetivo de determinar la envolvente económica óptima. A partir de esta, se pueden seleccionar fases de explotación apropiadas para el diseño de la mina ([Newman et al., 2010](#)).

### 2.5.3 Metodología asistida diseño de rampas

Esta metodología asistida, se basa en un código que busca determinar la mejor ruta posible para una rampa a nivel de bloques, de forma que se maximice el valor económico total de los bloques extraídos, respetando a su vez las restricciones geotécnicas y operacionales del diseño minero.

Se parte de un modelo de bloques valorizado en el que ya existe una envolvente económica (pit final). El objetivo es diseñar una rampa desde la superficie hasta el nivel más profundo del pit, pasando una sola vez por cada banco.

Se asume que los pit mineros se pueden ajustar mediante un cono elíptico a través de 7 variables con  $a, b, \in R +$  que son a los semis ejes de este cono,  $h \in R +$  que es la altura del cono,  $\eta \in [-\pi/2, \pi/2)$  el cual es el ángulo de rotación basal y  $X_c, Y_c, Z_c \in R$ , que son el centro de la elipse basal en coordenadas cartesianas.

Se denota como  $C$  el espacio de parámetros que caracterizan estos conos, el cual se puede caracterizar como,

$$C = \{(a, b, h, \eta, X_c, Y_c, Z_c) \in \mathbb{R}^7 : a, b, h \geq 0, \eta \in [-\pi/2, \pi/2)\}$$

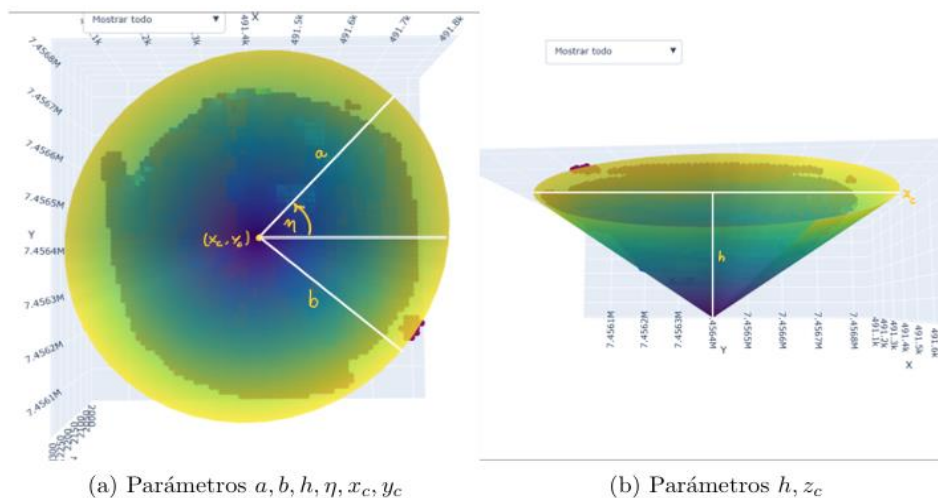


Figura 5: Visualización de parámetros en un cono

Con estos parámetros se busca un cono que maximice el valor del proyecto. Por lo que si tenemos  $M$  que denota el conjunto de centros de los bloques y  $Value(x)$  es el valor de ganancia o pérdida del bloque  $x$ , entonces se busca,

$$best\ cono = \underset{cono \in C}{\operatorname{argmax}} \sum_{x \in M \cap cono} Value(x)$$

Para calcular el  $Value(x)$  se necesita una ley de corte  $L$ , entonces:

$$Value(x) = \begin{cases} -C_m \delta(x) vol & , \quad \text{sí } \mu(x) < L \\ (P - C_r) \cdot FTL \cdot R \cdot \mu(x) \delta(x) vol - (C_p + C_m) \delta(x) vol & , \quad \text{sí } \mu(x) \geq L \end{cases}$$

Donde  $P$  es el precio del mineral,  $C_m, C_p, C_r$  son los costos de mina, procesamiento y refinamiento respectivamente,  $\delta(x)$  y  $\mu(x)$  son la densidad y la ley del bloque,  $FTL$  es el factor de tonelada a libra,  $R$  es el factor de recuperación y  $vol$  es el volumen del bloque.

Para decidir la rampa optima se entiende de que todos los bloques sobre la rampa deben ser extraídos y que por el contrario los que se encuentran debajo se deben mantener. Para esto se realiza una iteración de todos los bloques que están por sobre y debajo de la rampa y, por cada uno de estos, se observa que bloques soportan y preceden usando un cono cuyo ángulo de apertura es el ángulo de talud.

Por lo tanto, suponiendo que hay un cono fijo, el problema se escribe:

$$best\ rampa = \underset{(\theta_0, \vec{d}, \beta, \vec{z}_{switchback}, M, \lambda_{switchback}) \in D}{\operatorname{argmax}} J(\theta_0, \vec{d}, \beta, \vec{z}_{switchback}, M, \lambda_{switchback})$$

Donde  $\theta_0$  es el ángulo inicial donde parte la rampa respecto a la parametrización del cono,  $\vec{d}$  es un vector que indica el descenso por fase banco,  $\beta$  es la orientación inicial,  $\vec{z}_{switchback}$  es un vector con las alturas donde se harán los switchbacks,  $M$  es un entero el cual indica que solamente se harán los primeros  $M$  switchbacks del vector  $\vec{z}_{switchback}$  y  $\lambda_{switchback}$  es un parámetro de profundidad de la rampa relacionado a todos los switchbacks.

En donde  $J$  es la función objetivo que se busca maximizar a través de iteraciones, se define como:

$$J = \sum_{x \in ((M \cap cono) \cup Precedence) \setminus Support} Value(x) - Longitud(rampa)$$

El código presenta la capacidad de buscar rampas en espiral, con switchback y con descenso constante o variable, este último divide la rampa en trozos que unen fases-bancos de modo que la rampa total es de descenso constante a trozos teniendo la capacidad de elegir la cantidad de estos trozos.

Respecto a los tiempos de cómputo, las rampas con descenso variable tardan notablemente más, puesto que su espacio de búsqueda es mucho mayor en dimensión con respecto a la rampa en espiral. En particular, el espacio de búsqueda de la rampa en espiral tiene dimensión 3, mientras que los de la rampa en espiral a descenso variable y con switchbacks tienen dimensión 28 y 33 respectivamente ([Asbún, Allendes, 2025](#)).

## 2.6. Ancho operacional

El ancho operacional corresponde al espacio mínimo requerido en el fondo del pit para permitir la ejecución segura y eficiente de las actividades mineras, como la carga, perforación, maniobra de equipos y tránsito de camiones. Esta condición representa una restricción operativa crítica que debe ser considerada en el diseño geométrico de una mina a cielo abierto, ya que impacta directamente en la factibilidad técnica del proyecto. No contemplar este parámetro puede derivar en configuraciones estrechas e inviables, que obliguen a rediseños posteriores o generen sobrecostos en la fase de explotación. La integración del ancho operacional en los modelos de optimización permite obtener diseños más realistas, que reflejan adecuadamente las condiciones físicas requeridas para operar en la base del rajo. ([Morales et al., 2023](#)).

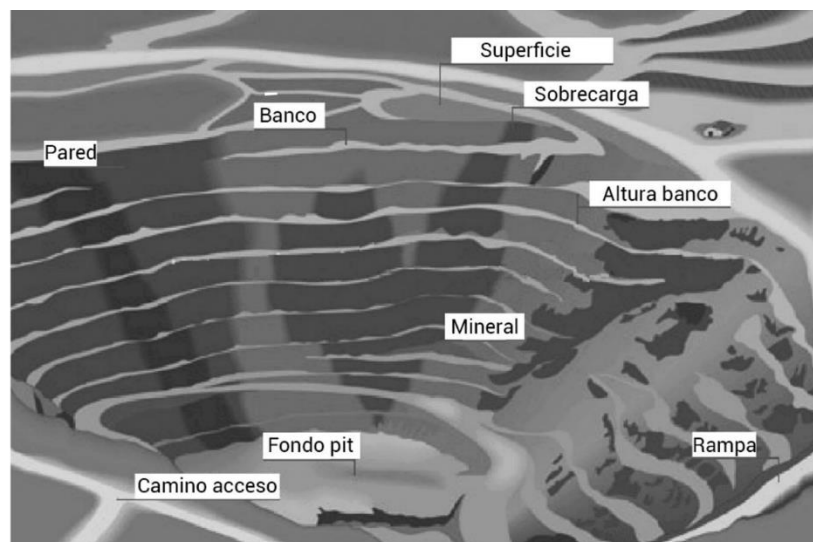


Figura 6: Sectores mina cielo abierto

## 2.7. Fases del pit

En el contexto del diseño de minas a cielo abierto, se distinguen principalmente dos enfoques según la secuenciación de la extracción: el pit monofase y el pit multifase. El diseño monofase corresponde a una envolvente única que delimita el pit final, sin subdivisiones intermedias, y es utilizado en casos donde la operación es simple, de vida útil corta o donde las condiciones económicas y técnicas no justifican una mayor subdivisión. Por otro lado, el diseño multifase consiste en fraccionar el pit final en varias fases, que permiten planificar la explotación de forma progresiva, facilitando una mejor gestión de los flujos de caja, control geotécnico y acceso operacional. Esta subdivisión es fundamental para optimizar la secuencia de extracción y anticiparse a cambios en precios, leyes o costos operacionales, lo cual es especialmente relevante en minas de gran escala o con depósitos complejos ([Hustrulid et al., 2013](#)).

### 3. Metodología propuesta

1. Revisión Bibliográfica:

Se hará una revisión de literatura técnica y académica sobre el diseño de rampas en minería a cielo abierto, metodología de optimización, conectividad entre fases, ángulo global y accesibilidad. Esta etapa servirá como base conceptual para sustentar la propuesta metodológica.

2. Caracterización y evaluación de los modelos de bloques:

Se buscará trabajar con diferentes modelos de bloques que sean lo más representativos posible para simular distintos escenarios de diseño. Se realizará una descripción detallada de cada modelo, incluyendo su morfología, distribución de leyes, volumen y número de bloques.

3. Generación de rampas con metodología semiautomática:

Se implementará un modelo computacional mediante un script de Python que permita generar rampas a nivel de bloques, considerando las restricciones geométricas y operacionales. Posteriormente desarrollarán las rampas utilizando el enfoque de diseño semiautomático dentro del software Datamine OP. Esto se realizará para las distintas combinaciones y configuraciones, variando el punto de entrada y geometría.

4. Comparación técnica y económica:

Se realiza una comparación técnica y económica entre los escenarios evaluados, considerando parámetros como ángulo global, longitud de rampas y accesibilidad, junto con indicadores económicos como tonelaje extraíble, ratio estéril/mineral y beneficio obtenido. Esto permite identificar la alternativa más eficiente y rentable para la operación.

5. Conclusiones y recomendaciones:

Se presentarán las principales conclusiones, estableciendo las ventajas, limitaciones y posibles mejoras de la metodología semiautomática.

## 4. Caso de estudio N°1

El caso de estudio corresponde al modelo de bloques de una mina de extracción de cobre y oro, el cual tiene como nombre “Marvin”. Las características de este modelo se pueden ver en la Tabla 1.

Tabla 1: Características modelo de bloques Marvin.

|                            |        |
|----------------------------|--------|
| Tamaño de bloques en X [m] | 30     |
| Tamaño de bloques en Y [m] | 30     |
| Tamaño de bloques en Z [m] | 30     |
| Cantidad de bloques en X   | 73     |
| Cantidad de bloques en Y   | 77     |
| Cantidad de bloques en Z   | 16     |
| Cantidad total de bloques  | 53.271 |

Este modelo corresponde a un depósito masivo de cobre y oro, compuesto por 53.271 bloques. La Figura 7 presenta la representación del modelo.

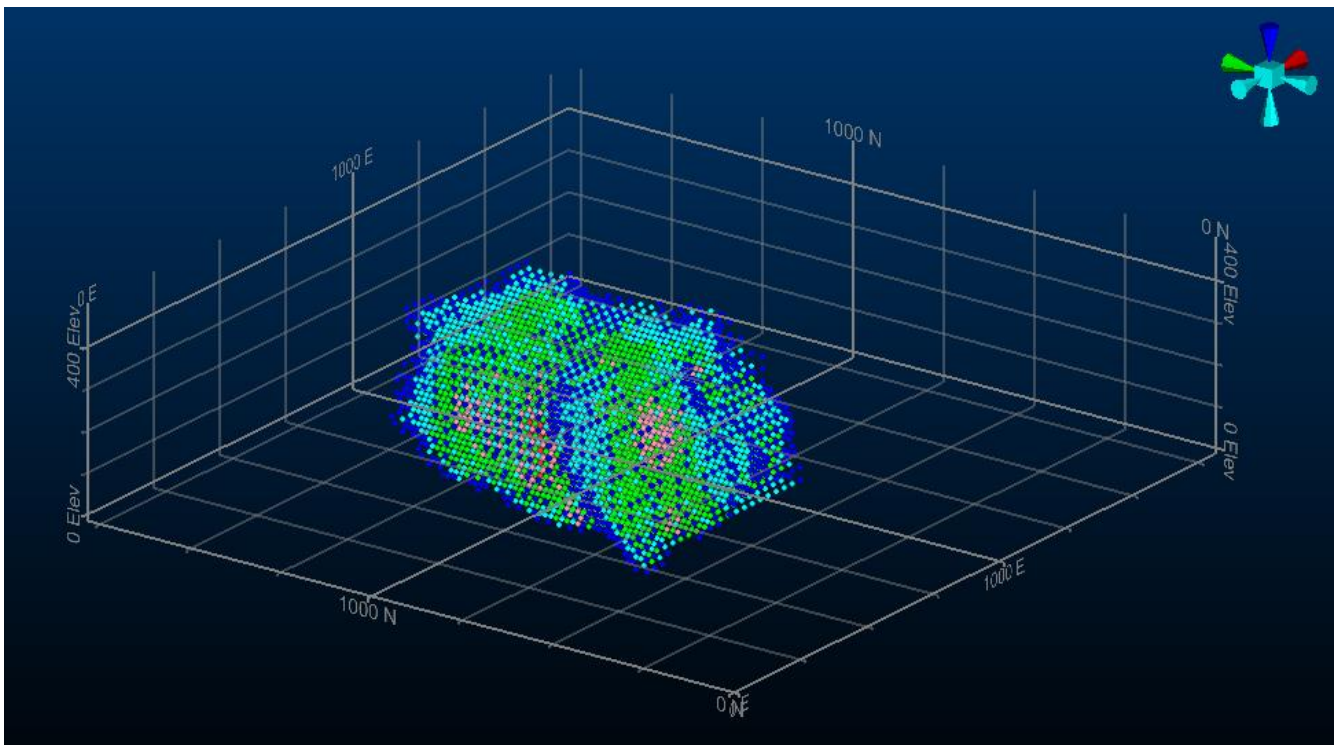


Figura 7: Modelo de Bloques Marvin

## 4.1. Descripción

### 4.1.1 Estadística básica

A través del modelo de bloques, se obtuvieron las estadísticas básicas para la ley de cobre, de oro y ley equivalente de cobre. En las Tablas 2, 3 y 4 se presentan las estadísticas básicas.

*Tabla 2: Estadísticas básicas para ley de cobre en caso de estudio N°1*

| Estadística         | Valor | Unidad |
|---------------------|-------|--------|
| Media               | 0.053 | %      |
| Máximo              | 1.463 | %      |
| Mínimo              | 0.000 | %      |
| Varianza            | 0.029 | %      |
| Desviación estándar | 0.172 | %      |

*Tabla 3: Estadísticas básicas para ley de oro en caso de estudio N°1*

| Estadística         | Valor | Unidad |
|---------------------|-------|--------|
| Media               | 0.050 | ppm    |
| Máximo              | 1.416 | ppm    |
| Mínimo              | 0.000 | ppm    |
| Varianza            | 0.028 | ppm    |
| Desviación estándar | 0.166 | ppm    |

*Tabla 4: Estadísticas básicas para ley equivalente en caso de estudio N°1*

| Estadística         | Valor  | Unidad |
|---------------------|--------|--------|
| Media               | 0.084  | %      |
| Máximo              | 2.020  | %      |
| Mínimo              | 0.000  | %      |
| Varianza            | 0.0711 | %      |
| Desviación estándar | 0.266  | %      |

También, en los Gráficos 1, 2 y 3 se tienen las curvas tonelaje-ley del modelo para el cobre, oro y ley equivalente de cobre.

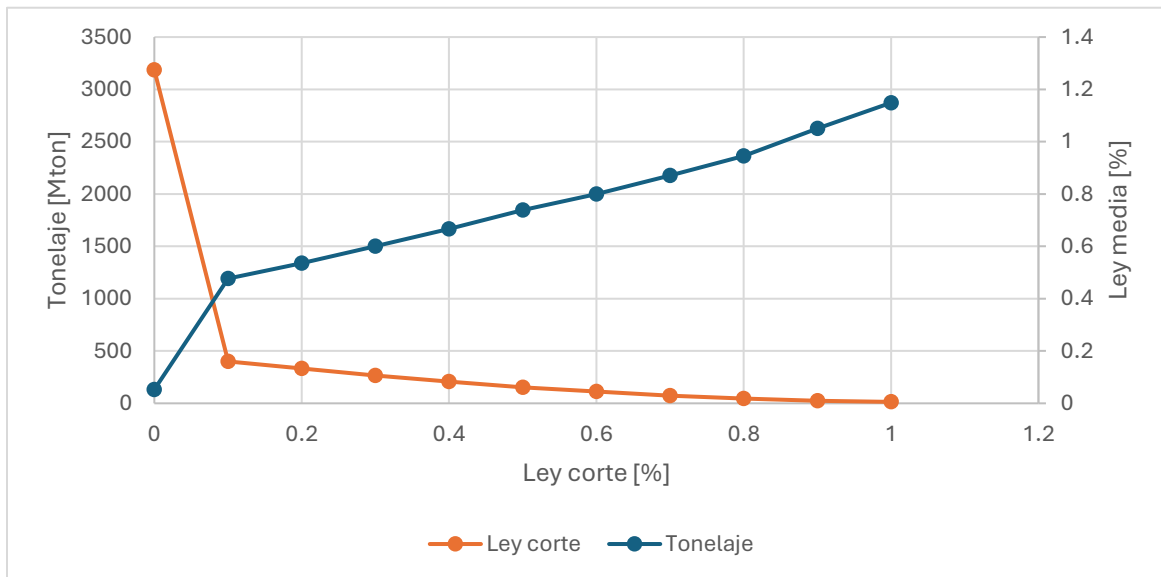


Gráfico 1: Curva tonelaje-ley del cobre.

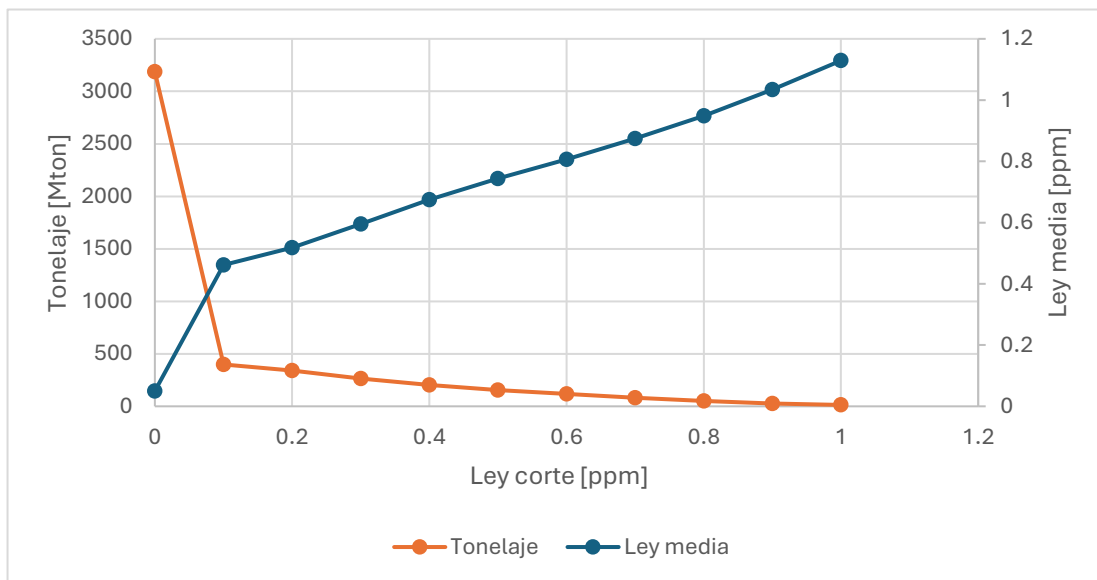


Gráfico 2: Curva tonelaje-ley del oro.

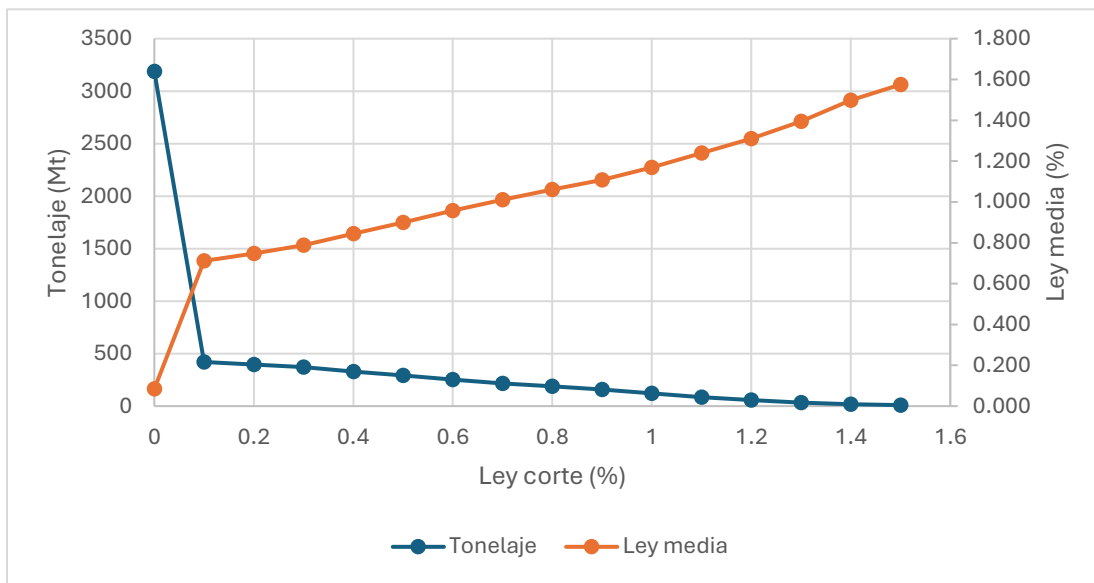


Gráfico 3: Curva tonelaje-ley de la ley equivalente

#### 4.1.2 Selección de parámetros

Para el desarrollo del caso de estudio, se utilizaron los siguientes parámetros económicos y metalúrgicos, los cuales se considerarán fijos a través del tiempo. Estos parámetros se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5: Parámetros económicos del caso de estudio.

| Parámetro                      | Valor  | Unidad      |
|--------------------------------|--------|-------------|
| Costo mina                     | 0.0004 | USD/lb      |
| Recuperación metalúrgica cobre | 88     | %           |
| Recuperación metalúrgica oro   | 60     | %           |
| Costo planta                   | 0.0018 | USD/lb      |
| Precio cobre                   | 0.9    | USD/lb      |
| Precio oro                     | 373    | USD/oz troy |
| Costo venta cobre              | 0.326  | USD/lb      |
| Costo venta oro                | 6.22   | USD/oz troy |

#### 4.2. Pit final

Se presentan los seis escenarios de pit final considerados en el estudio. El primer pit llamado UPIT, es el pit final que no cuenta con ninguna rampa y será considerado de referencia para la comparación del resto de pit finales, por otro lado, el Best es la mejor rampa encontrada por el software y los restantes cuatro tienen un nombre asociado al azimut donde parte la rampa y sentido que toma. Para cada uno de ellos se resumen las leyes y tonelajes asociadas a su respectiva configuración de rampa, con el fin de establecer una base comparativa entre alternativas.

Tabla 6: Leyes y reservas pits finales

|                       | UPIT   | BestRamp | NorhtPos | EastNeg | SouthPos | WestNeg | Unidad |
|-----------------------|--------|----------|----------|---------|----------|---------|--------|
| Ley de corte critica  | 0.435  | 0.435    | 0.435    | 0.435   | 0.435    | 0.435   | %      |
| Ley de corte marginal | 0.355  | 0.355    | 0.355    | 0.355   | 0.355    | 0.355   | %      |
| Ley media             | 0.479  | 0.478    | 0.469    | 0.468   | 0.470    | 0.467   | %      |
| Reservas              | 308.86 | 308.14   | 307.53   | 308.56  | 305.92   | 308.65  | Mt     |

A continuación, en la Figura 8 se muestra la vista en planta de los seis pits finales analizados, mientras que en la Figura 9 se presenta la vista este de estos mismos pits finales.

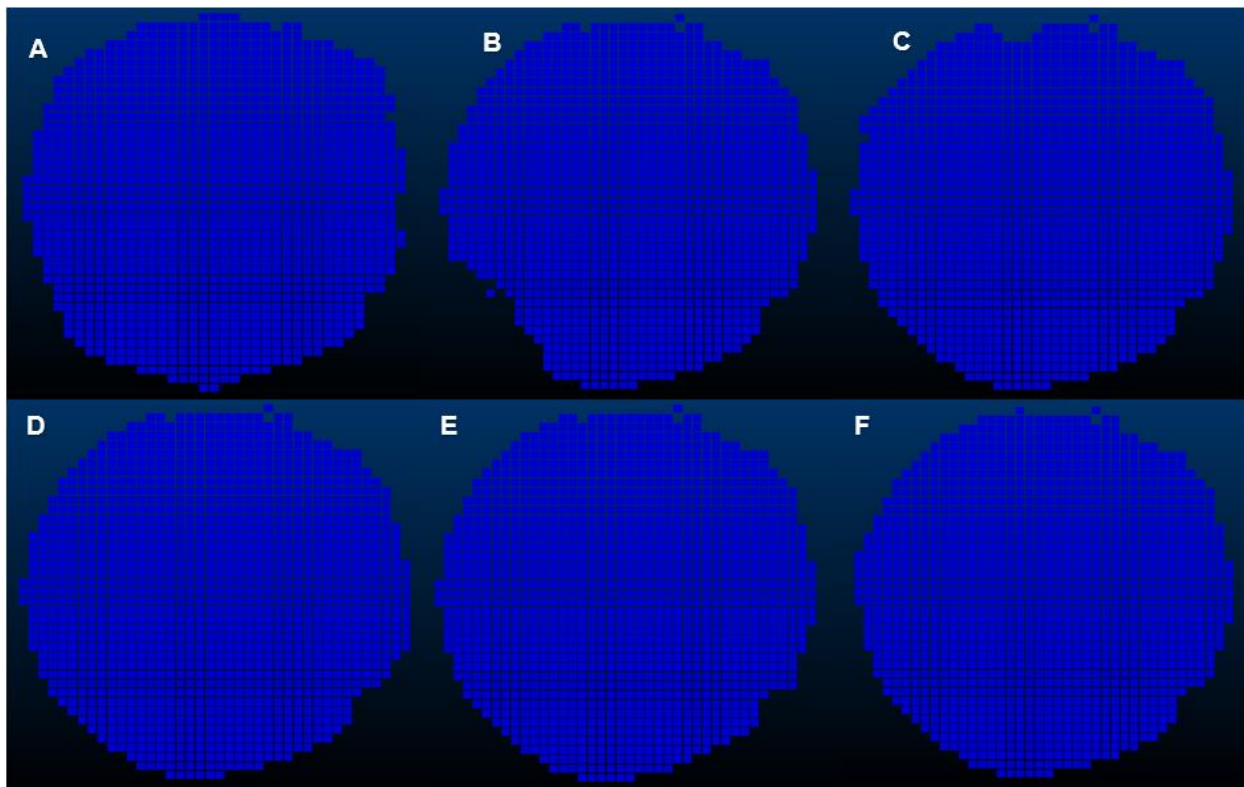


Figura 8: Vista planta pit final UPIT (A), Best (B), NorthPos (C), EastNeg (D), SouthPos (E) y WestNeg (F)

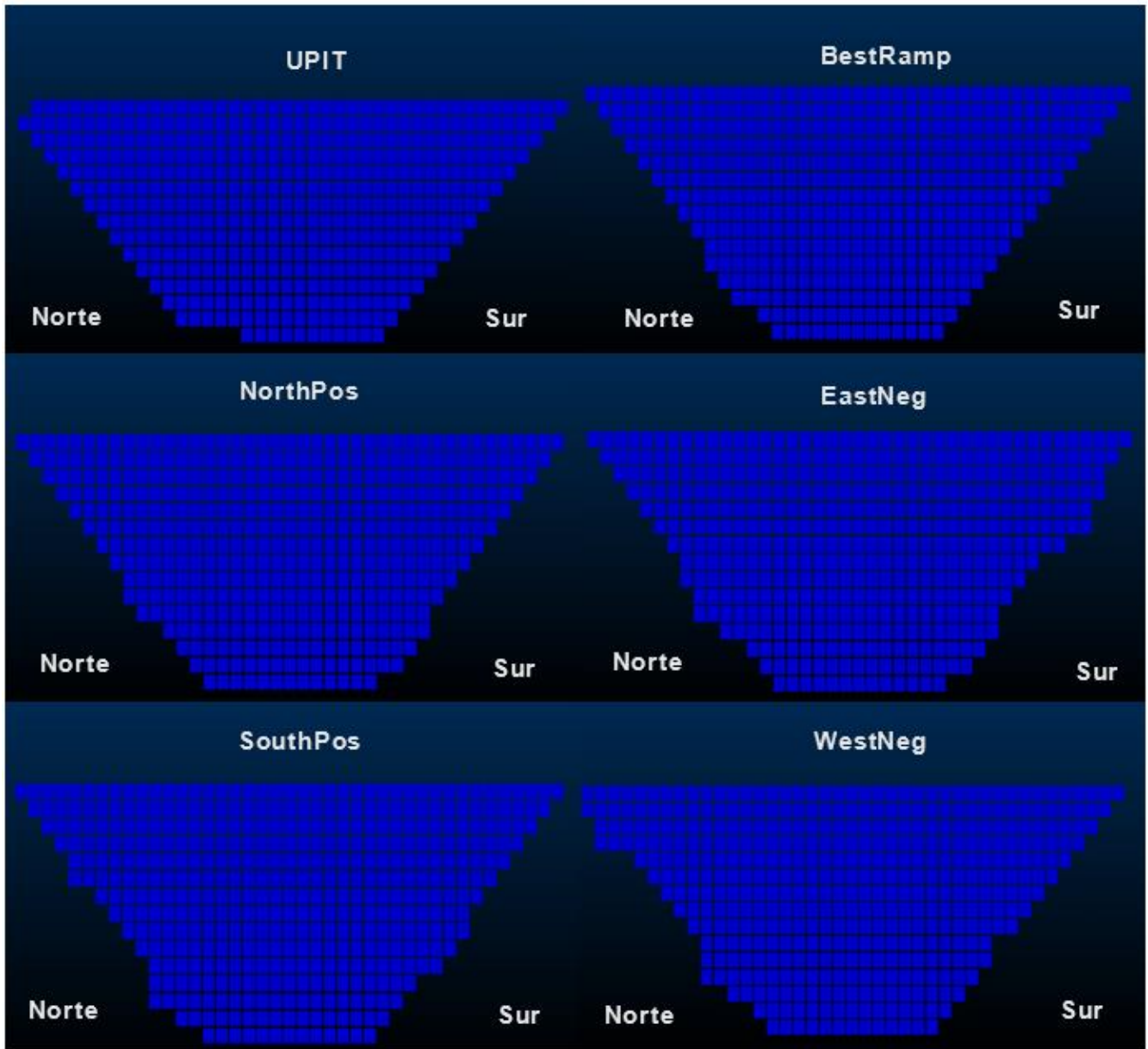


Figura 9: Vista Este pits finales

A continuación, en la Tabla 7 se presentan los ocho ángulos correspondientes a las direcciones principales de los seis pits finales considerados para el análisis.

Tabla 7: Ángulos globales pit finales caso de estudio N°1

| Tabla 7: Cara | UPIT  | BestRamp | NorthPos | EastNeg | SouthPos | WestNeg |
|---------------|-------|----------|----------|---------|----------|---------|
| Norte         | 39.51 | 47.04    | 47.02    | 47.03   | 44.88    | 46.97   |
| Sur           | 46.84 | 46.75    | 46.97    | 46.75   | 44.59    | 46.90   |
| Este          | 47.02 | 44.95    | 47.13    | 44.92   | 44.75    | 43.17   |
| Oeste         | 46.93 | 45.00    | 44.77    | 44.85   | 44.45    | 44.94   |
| Noroeste      | 38.17 | 46.86    | 45.00    | 44.36   | 44.68    | 48.72   |
| Noreste       | 37.94 | 46.96    | 44.93    | 46.03   | 46.92    | 46.13   |
| Suroeste      | 45.12 | 53.95    | 47.01    | 46.38   | 46.38    | 46.22   |
| Sureste       | 44.16 | 48.79    | 46.20    | 43.52   | 43.73    | 48.77   |

Finalmente, en la Tabla 8 se presentan las cubicaciones finales correspondientes a los seis pits considerados en el caso de estudio 1.

Tabla 8: Cubicaciones pits finales caso de estudio N°1

|                                     | UPIT   | BestRamp | NorthPos | EastNeg | SouthPos | WestNeg | Unidad |
|-------------------------------------|--------|----------|----------|---------|----------|---------|--------|
| Tonelaje total                      | 527.14 | 527.85   | 535.93   | 545.62  | 535.04   | 538.83  | Mt     |
| Tonelaje mineral                    | 308.86 | 308.14   | 307.53   | 308.56  | 305.92   | 308.65  | Mt     |
| Ley media equivalente Cu en mineral | 0.892  | 0.888    | 0.889    | 0.889   | 0.890    | 0.889   | %      |
| Fino cobre equivalente              | 2.755  | 2.737    | 2.734    | 2.742   | 2.723    | 2.743   | Mt     |
| Tonelaje estéril                    | 218.28 | 219.71   | 227.74   | 237.06  | 229.11   | 230.18  | Mt     |
| Razón estéril/mineral               | 0.706  | 0.713    | 0.739    | 0.768   | 0.748    | 0.745   | -      |
| Beneficio mineral                   | 1,612  | 1,595    | 1,595    | 1,599   | 1,590    | 1,602   | MUSD   |
| Beneficio estéril                   | -196.4 | -197.7   | -204.6   | -213.3  | -206.2   | -207.1  | MUSD   |
| Beneficio total                     | 1,415  | 1,397    | 1,391    | 1,385   | 1,384    | 1,395   | MUSD   |

### 4.3. Resultados

El diseño de rampa obtenido mediante la metodología asistida se apoya en pit finales a soporte de bloques, por lo que su resultado inicial no es directamente aplicable desde el punto de vista operacional. Es por lo que, el diseño debe ser suavizado mediante el uso del software Studio OP. Este ajuste se hace mediante la ayuda de la metodología asistida la cual no solo entrega los pit finales a soporte de bloques, sino que también entrega una rampa de línea de puntos con sus respectivas coordenadas en los tres ejes cartesianos, con la intención de tener una referencia que seguir el momento de hacer el ajuste suavizado. En esta fase se incorporan los parámetros geotécnicos como ángulo cara banco, ancho de berma y otros, lo que genera variaciones en el beneficio económico y en los tonelajes destinados a planta y botadero.

#### 4.3.1 Best

A continuación, se presentan los parámetros geométricos considerados en el pit suavizado, comenzando por aquellos asociados al caso Best. Estos incluyen el ancho de rampa, el ángulo de cara de banco, el ancho de berma, la altura de banco y la pendiente de la rampa, los cuales definen las condiciones geométricas y operacionales del diseño final.

*Tabla 9: Parámetros geométricos Best.*

| Parámetros         | Valor | Unidad |
|--------------------|-------|--------|
| Ancho de berma     | 6.5   | m      |
| Altura banco       | 15    | m      |
| Ancho de rampa     | 30    | m      |
| Ángulo cara-banco  | 70    | °      |
| Ángulo inter-rampa | 51.4  | °      |
| Pendiente          | 12    | %      |

En la Figura 10 y Figura 11 se muestra el diseño semiautomático del caso Best suavizado y como es su ajuste con la línea de puntos en vista planta y vista este respectivamente.

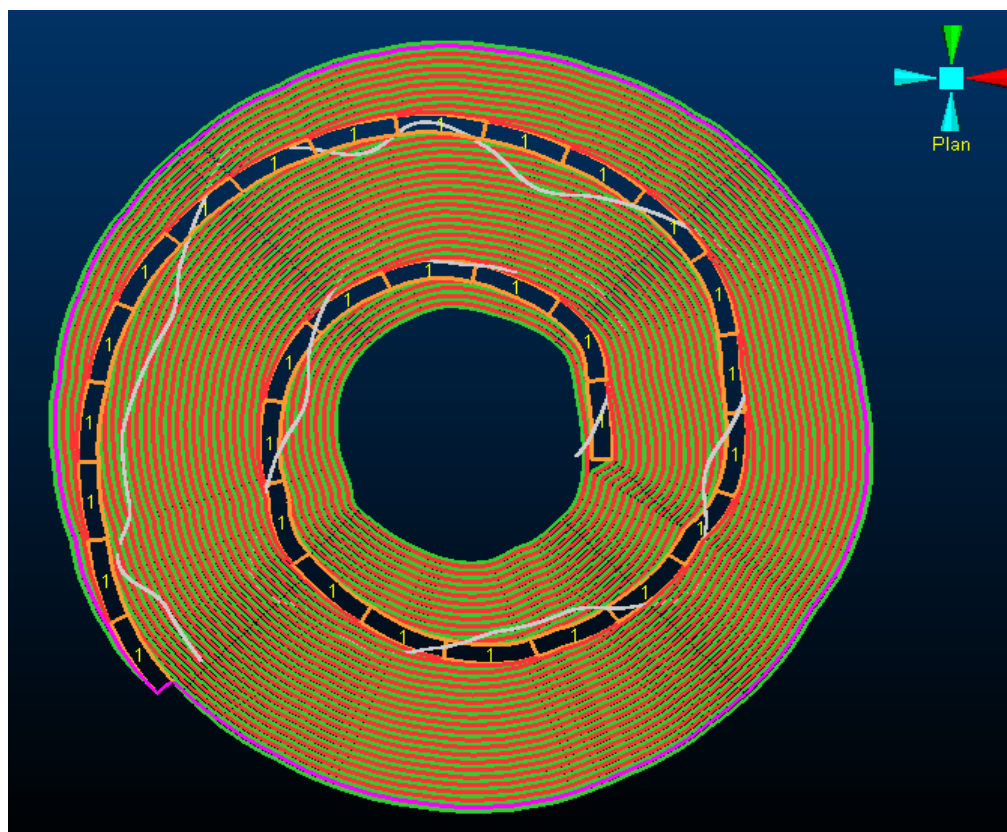


Figura 10: Vista planta ajuste entre rampa y línea de puntos

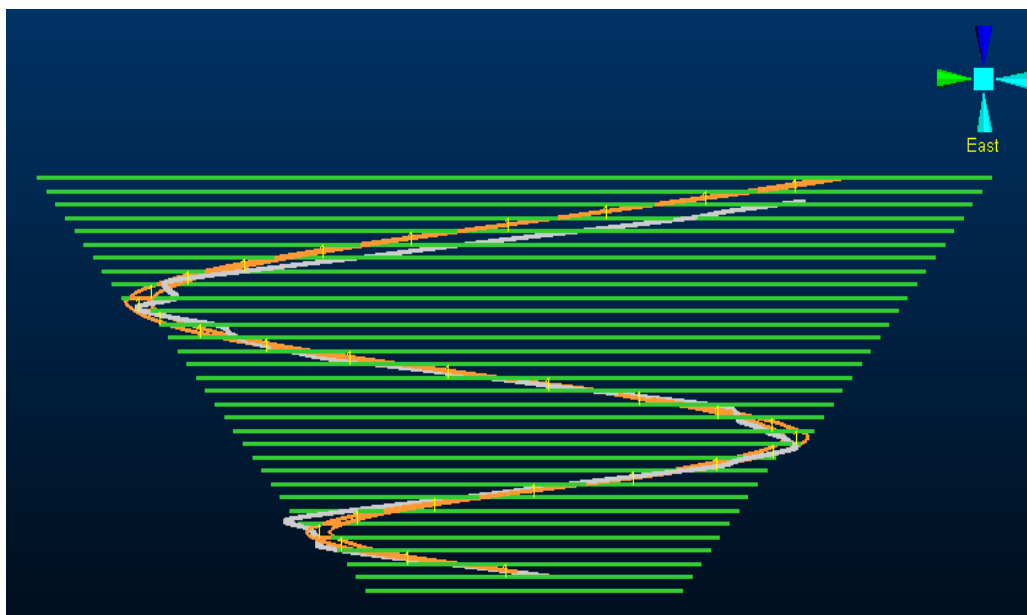


Figura 11: Vista este ajuste rampa y línea de puntos

En la Figura 12 se tiene el diseño semiautomático de rampa suavizado con la vista isométrica, mientras en la Figura 13 y la Figura 14, se muestra el diseño semiautomático junto con el pit final, en los cortes norte-sur y oeste-este, respectivamente.

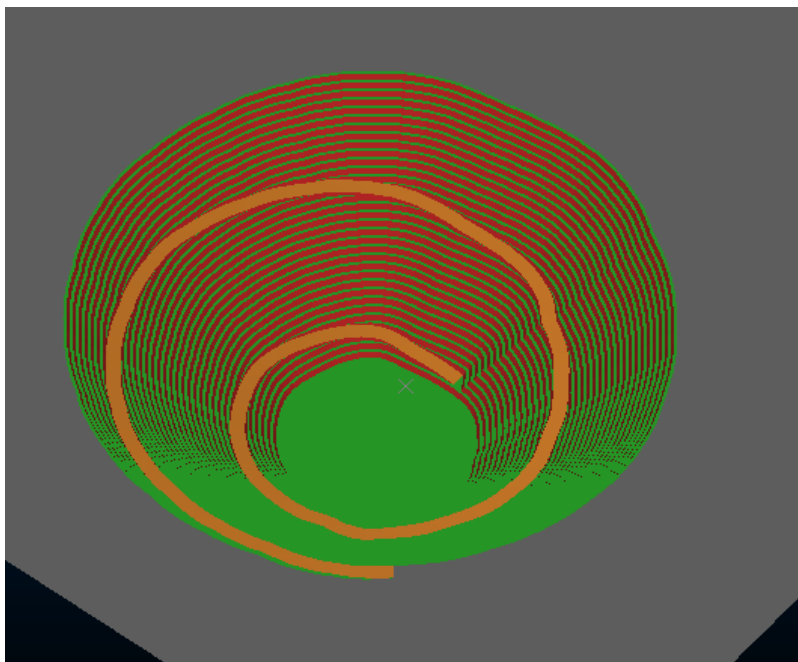


Figura 12: Diseño semiautomático de rampa suavizado, vista isométrica.

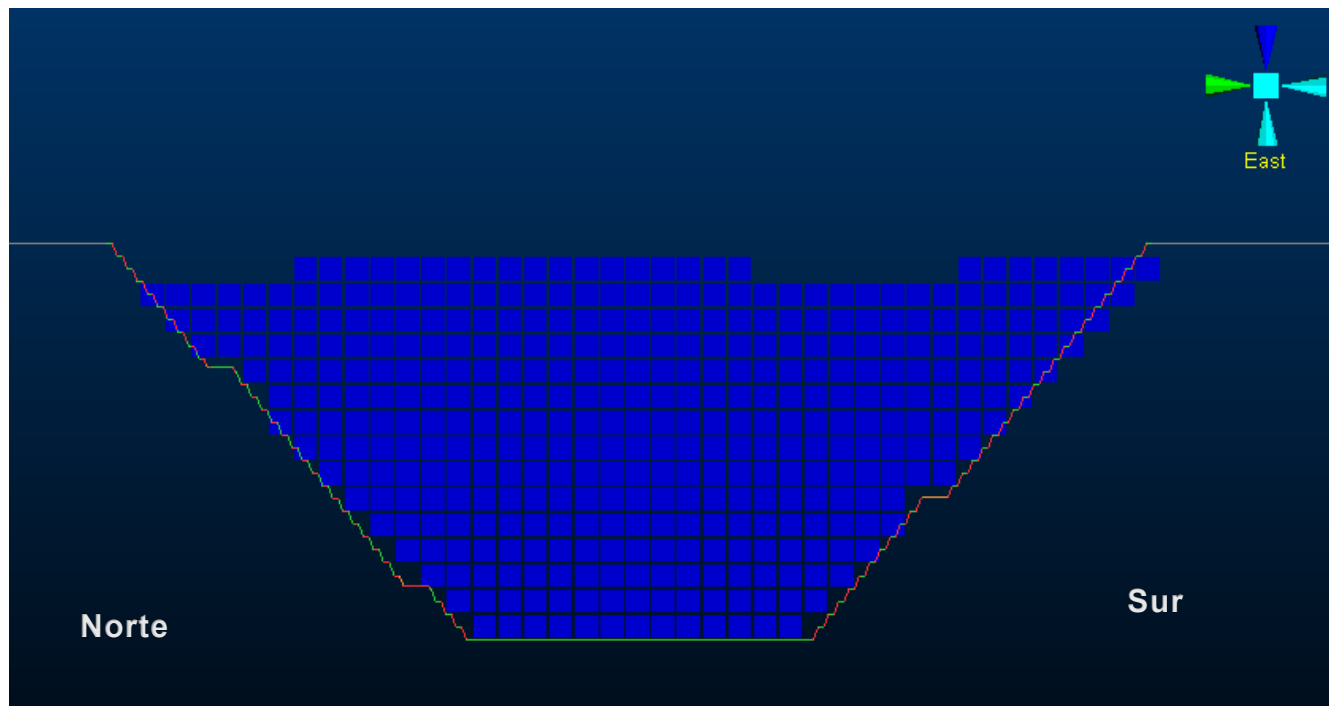


Figura 13: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte norte-sur.

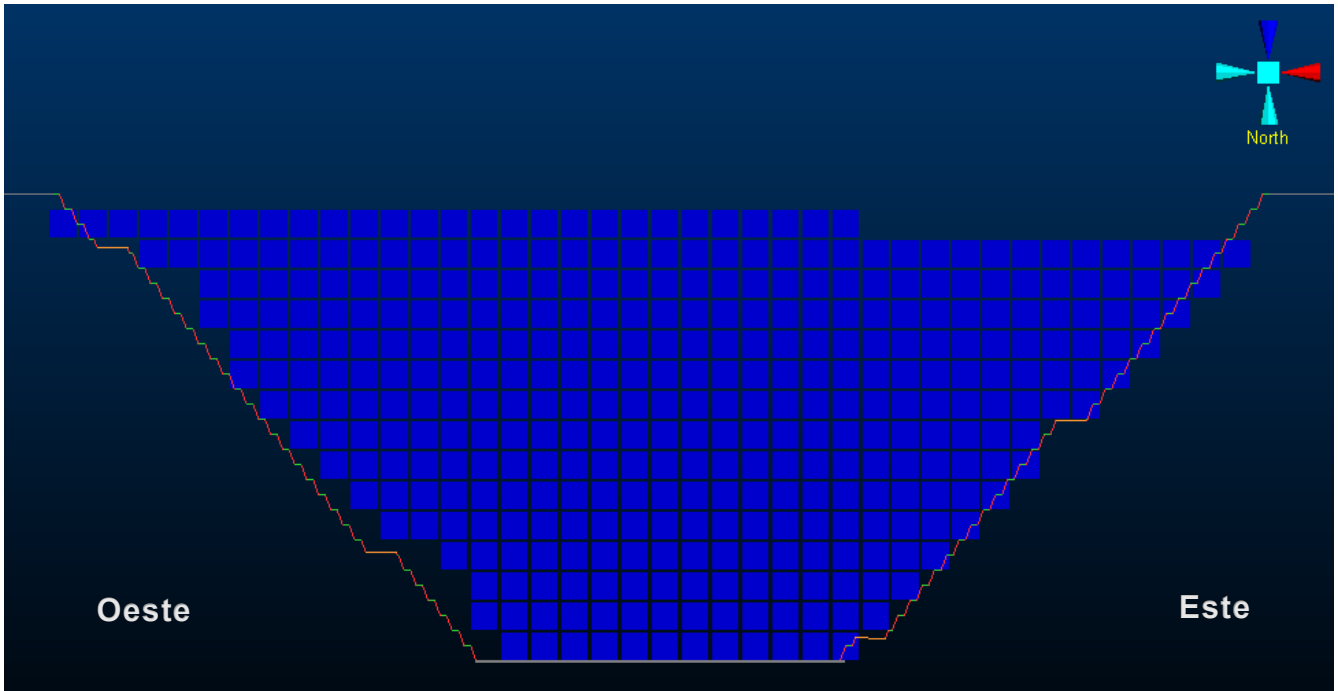


Figura 14: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte oeste-este.

Para una mejor visualización del diseño, se presenta la Figura 15, que muestra el corte Norte-Sur del diseño del pit suavizado y como ajusta con la rampa de línea de puntos, por otro lado, la Figura 16, presenta el corte Oeste-Este del mismo diseño bajo la misma configuración.

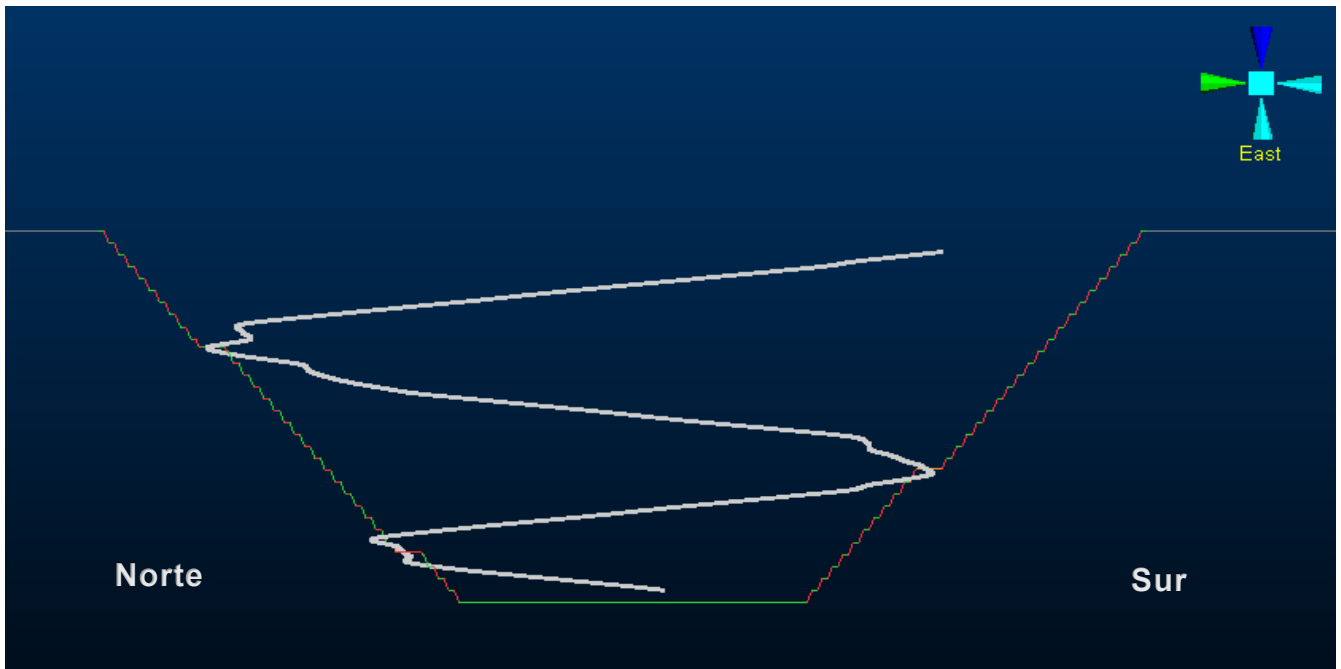


Figura 15: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte norte-sur.

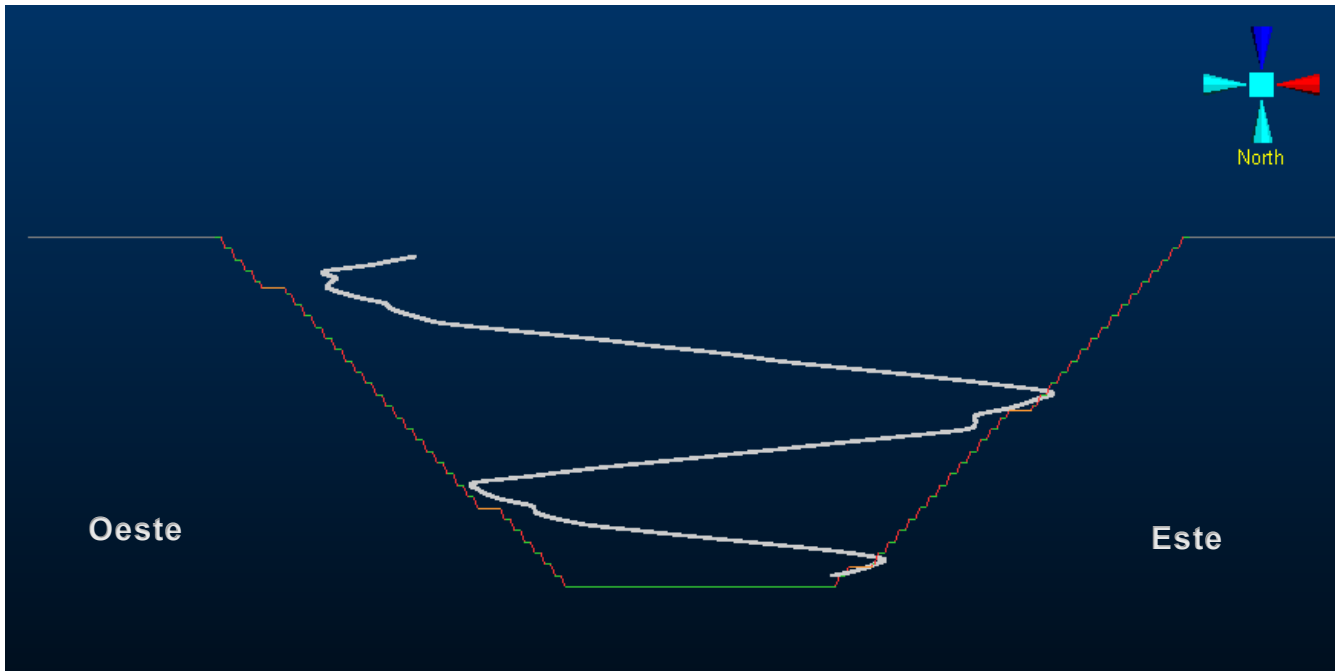


Figura 16: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte oeste-este.

Existen sectores en las paredes donde el proceso de suavizado no logra representar completamente a la línea de puntos original. Esto se explica por la dificultad de transformar trazados con radios y curvas muy reducidas, e incluso quiebres cercanos a 90°, en curvas continuas y operativamente viables. Por otra parte, la Tabla 10 muestra el comportamiento del ángulo global obtenido para cada pared.

Tabla 10: Ángulo caras diseño Best semiautomático.

| Cara     | Angulo (°) |
|----------|------------|
| Norte    | 47.62      |
| Sur      | 49.47      |
| Este     | 47.35      |
| Oeste    | 47.23      |
| Noreste  | 47.40      |
| Suroeste | 48.11      |
| Noroeste | 48.15      |
| Sureste  | 48.79      |

A continuación, en la Tabla 11 se presentan los resultados de la cubicación del diseño de Best semiautomático suavizado.

*Tabla 11: Cubicación diseño Best semiautomático.*

| Resultado                        | Diseño semiautomático | Unidad |
|----------------------------------|-----------------------|--------|
| Tonelaje total                   | 526.116               | Mt     |
| Tonelaje mineral                 | 310.208               | Mt     |
| Ley media cu equivalente mineral | 1.01                  | %      |
| Fino cobre equivalente           | 3.133                 | Mt     |
| Tonelaje estéril                 | 215.835               | Mt     |
| Razón estéril/mineral            | 0.695                 | -      |
| Beneficio mineral                | 1,603.536             | MUSD   |
| Beneficio estéril                | -194.251              | MUSD   |
| Beneficio total                  | 1,409.284             | MUSD   |

### 4.3.2 NorthPos

A continuación, se presentan los parámetros geométricos considerados en el pit suavizado para el caso NorthPos. De igual manera incluyen el ancho de rampa, el ángulo de cara de banco, el ancho de berma, la altura de banco y la pendiente de la rampa, los cuales definen las condiciones geométricas y operacionales del diseño final. Para este caso en particular se cambió el ancho de rampa a 7.5 m y se usaron 2 pendientes, una de 12 grados hasta la cota 150 y una de 10 grados hasta la cota 300.

Tabla 12: Parámetros geométricos NorthPos.

| Parámetros         | Valor | Unidad |
|--------------------|-------|--------|
| Ancho de berma     | 7.5   | m      |
| Altura banco       | 15    | m      |
| Ancho de rampa     | 30    | m      |
| Ángulo cara-banco  | 70    | °      |
| Ángulo inter-rampa | 49.2  | °      |
| Pendiente 1        | 12    | %      |
| Pendiente 2        | 10    | %      |

En la Figura 17 se muestra una vista planta del pit suavizado y la línea blanca representa el recorrido ideal realizado por el diseño semiautomático, por otro lado, la Figura 18 muestra lo mismo, pero desde una vista norte.

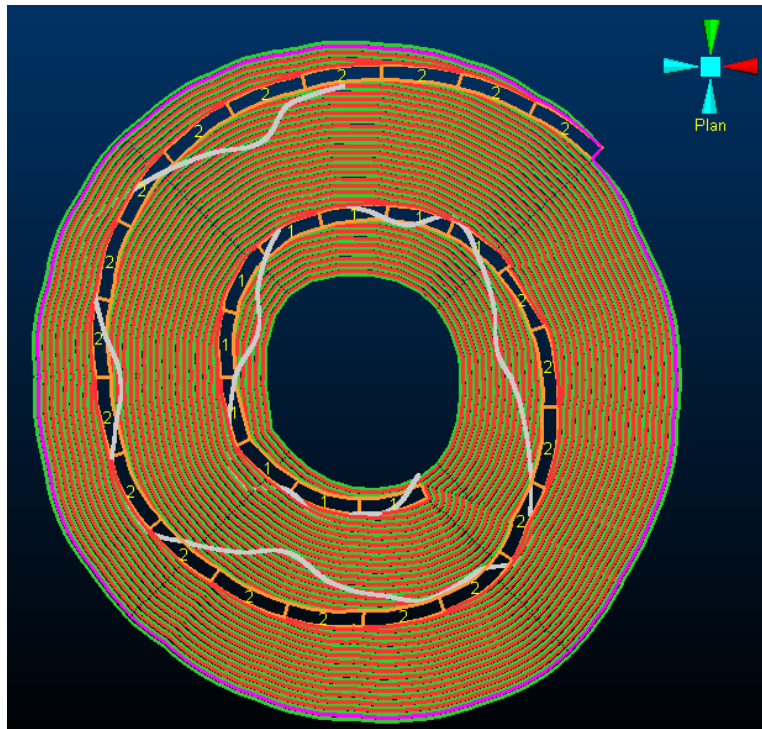


Figura 17: Vista planta ajuste pit suavizado y línea se puntos.

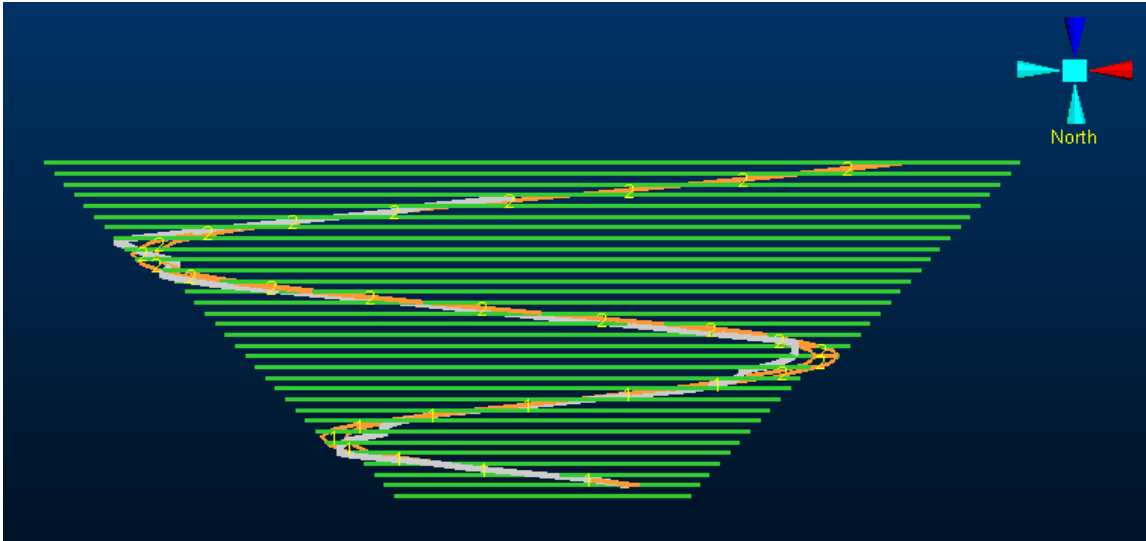


Figura 18: Vista este ajuste pit suavizado y línea de puntos.

La Figura 19 muestra una vista isométrica del pit suavizado, por otro lado, las Figuras 20 y 21 muestran el ajuste que existe entre el pit suavizado y el pit final a soporte de bloques en cortes Norte-Sur y Oeste-Este respectivamente.

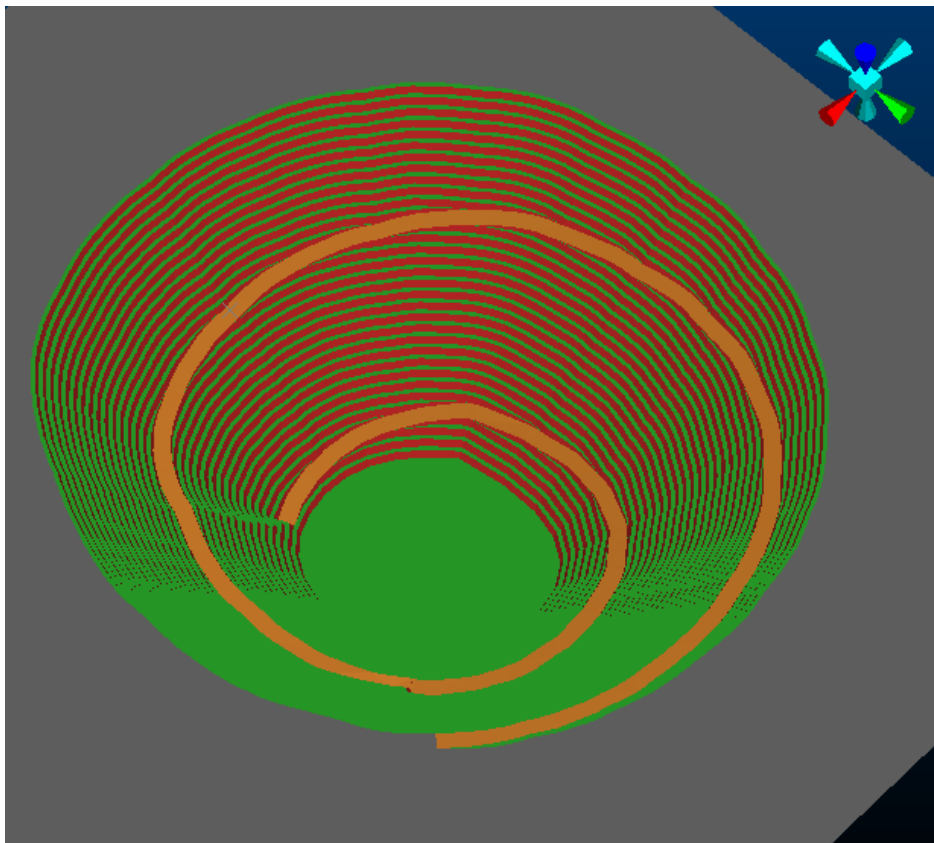


Figura 19: Diseño semiautomático de rampa suavizado, vista isométrica.

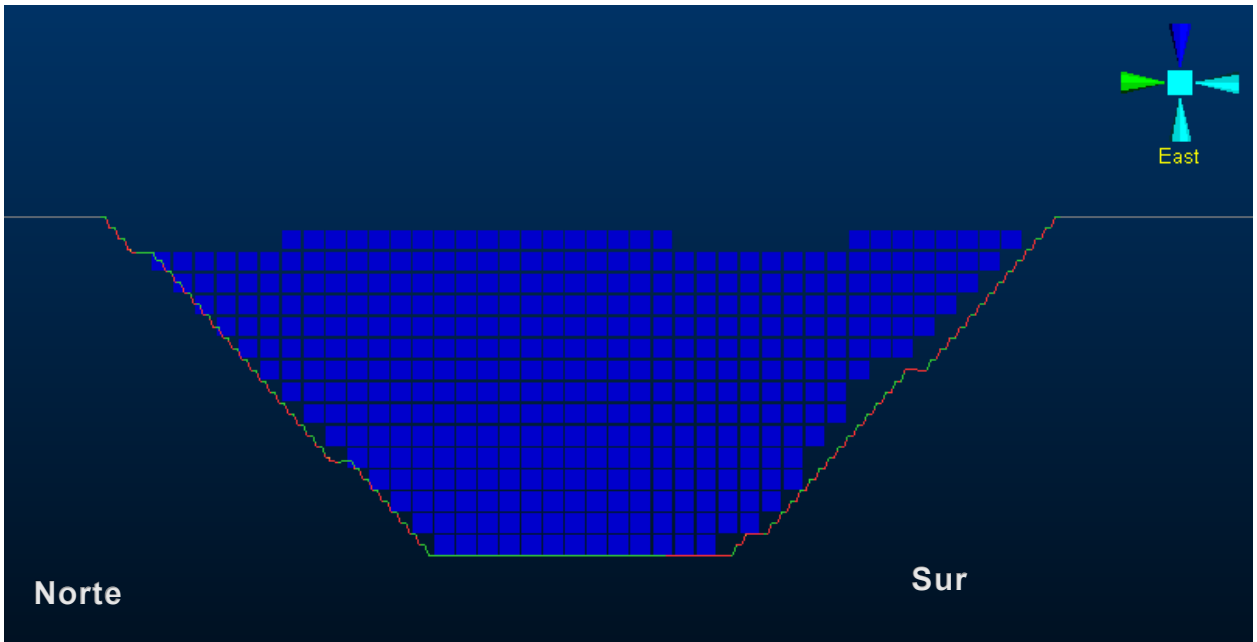


Figura 20: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte norte-sur

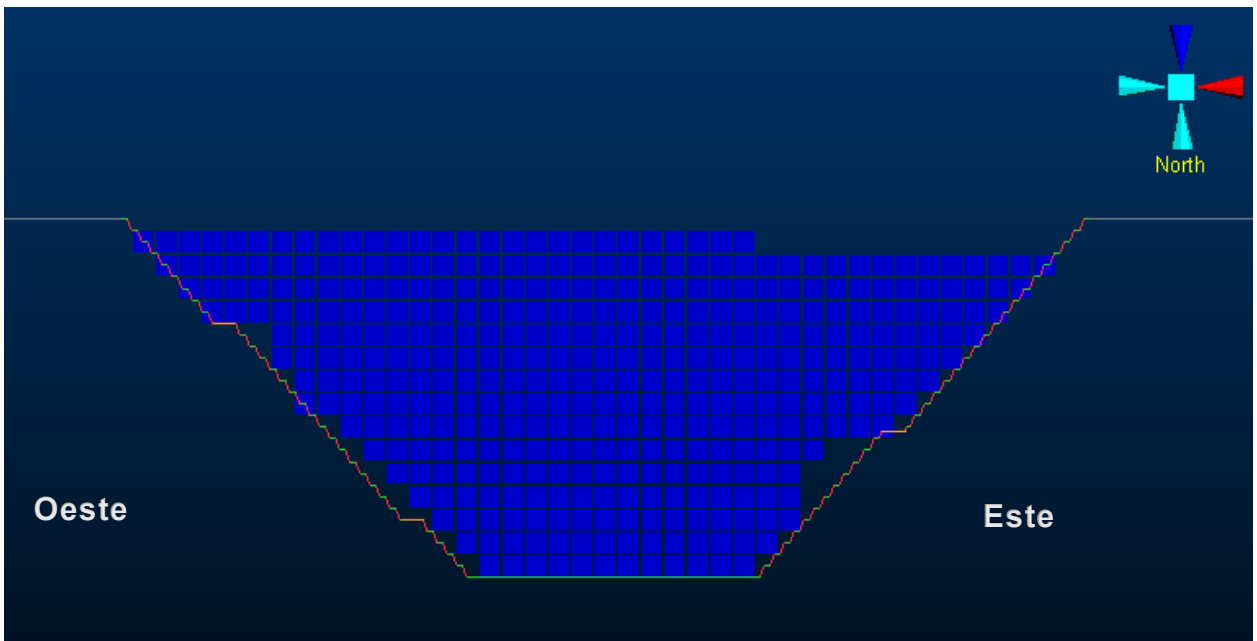


Figura 21: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte oeste-este

Para una mejor visualización del diseño, se presenta la Figura 22, que muestra el corte Norte-Sur del pit suavizado y como ajusta con la rampa de línea de puntos, por otro lado, la Figura 23, presenta el corte Oeste-Este del mismo diseño bajo la misma configuración.

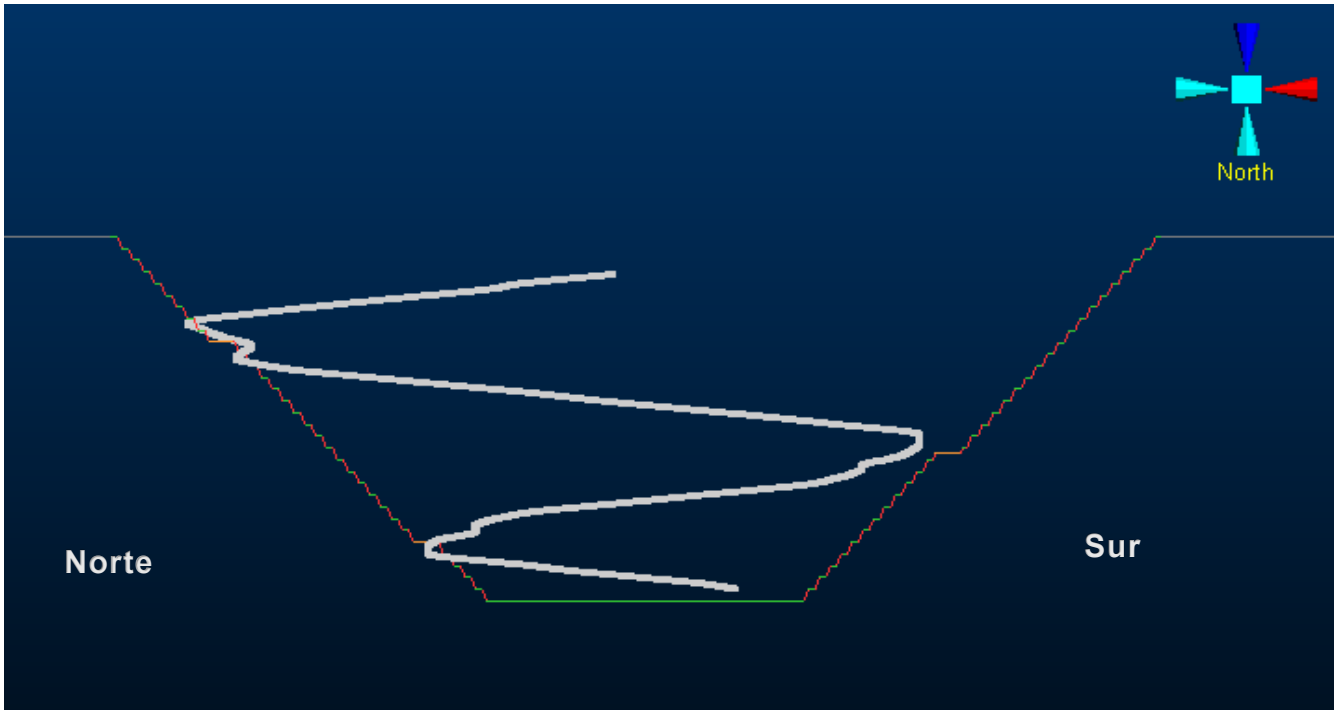


Figura 22: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte norte-sur.

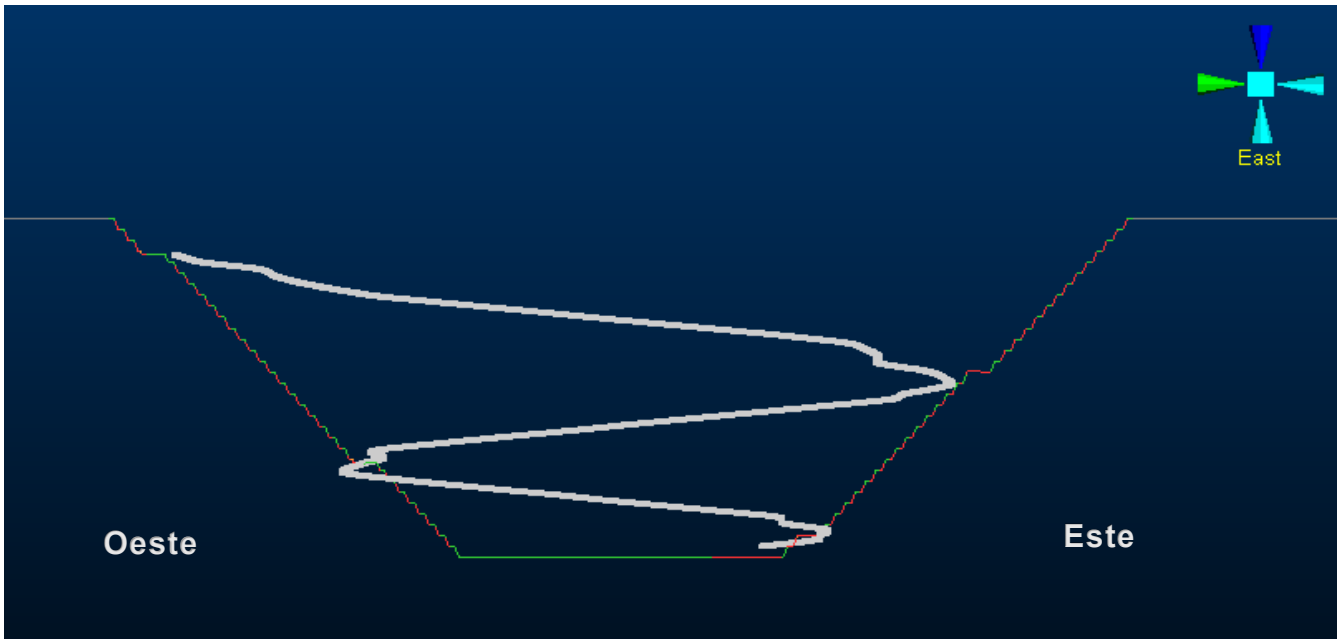


Figura 23: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte oeste-este.

En determinados sectores de las paredes, el suavizado no reproduce de manera íntegra la geometría definida por la rampa a soporte de bloques. Esto al igual que en el caso anterior se debe a la complejidad de adaptar trazados con radios extremadamente pequeños y cambios bruscos. Adicionalmente, la Tabla 13 presenta el comportamiento del ángulo global resultante para cada pared.

*Tabla 13: Ángulo caras diseño NorthPos semiautomático.*

| Cara     | Angulo (°) |
|----------|------------|
| Norte    | 45.72      |
| Sur      | 45.99      |
| Este     | 46.86      |
| Oeste    | 46.16      |
| Noreste  | 46.10      |
| Suroeste | 45.93      |
| Noroeste | 45.94      |
| Sureste  | 47.09      |

A continuación, en la Tabla 14 se presentan los resultados de la cubicación del diseño de NorthPos semiautomático suavizado.

*Tabla 14: Cubicación diseño NorthPos semiautomático.*

| Resultado                        | Diseño semiautomático | Unidad |
|----------------------------------|-----------------------|--------|
| Tonelaje total                   | 530.277               | Mt     |
| Tonelaje mineral                 | 306.881               | Mt     |
| Ley media cu equivalente mineral | 1.01                  | %      |
| Fino cobre equivalente           | 3.099                 | Mt     |
| Tonelaje estéril                 | 223.396               | Mt     |
| Razón estéril/mineral            | 0.695                 | -      |
| Beneficio mineral                | 1,593.827             | MUSD   |
| Beneficio estéril                | -201.056              | MUSD   |
| Beneficio total                  | 1,392.771             | MUSD   |

### 4.3.3 EastNeg

A continuación, se presentan los parámetros geométricos considerados en el pit suavizado, para el caso EastNeg. Al igual que los anteriores incluye el ancho de rampa, el ángulo de cara de banco, el ancho de berma, la altura de banco y la pendiente de la rampa, los cuales definen las condiciones geométricas y operacionales del diseño final. La Tabla 15 muestra que en este caso se cambió el ángulo cara banco que aumento a 72° y se hizo uso de dos rampas la numero uno con 11° de pendiente hasta la cota 120 y la segunda con 12° grados de pendiente hasta el final.

Tabla 15: Parámetros geométricos EastNeg

| Parámetros         | Valor | Unidad |
|--------------------|-------|--------|
| Ancho de berma     | 7.5   | m      |
| Altura banco       | 15    | m      |
| Ancho de rampa     | 30    | m      |
| Ángulo cara-banco  | 72    | °      |
| Ángulo inter-rampa | 50.5  | °      |
| Pendiente 1        | 11    | %      |
| Pendiente 2        | 12    | %      |

En la Figura 17 se muestra una vista planta del pit suavizado y la línea blanca representa el recorrido ideal realizado por el diseño semiautomático, por otro lado, la Figura 18 muestra lo mismo, pero desde una vista este.

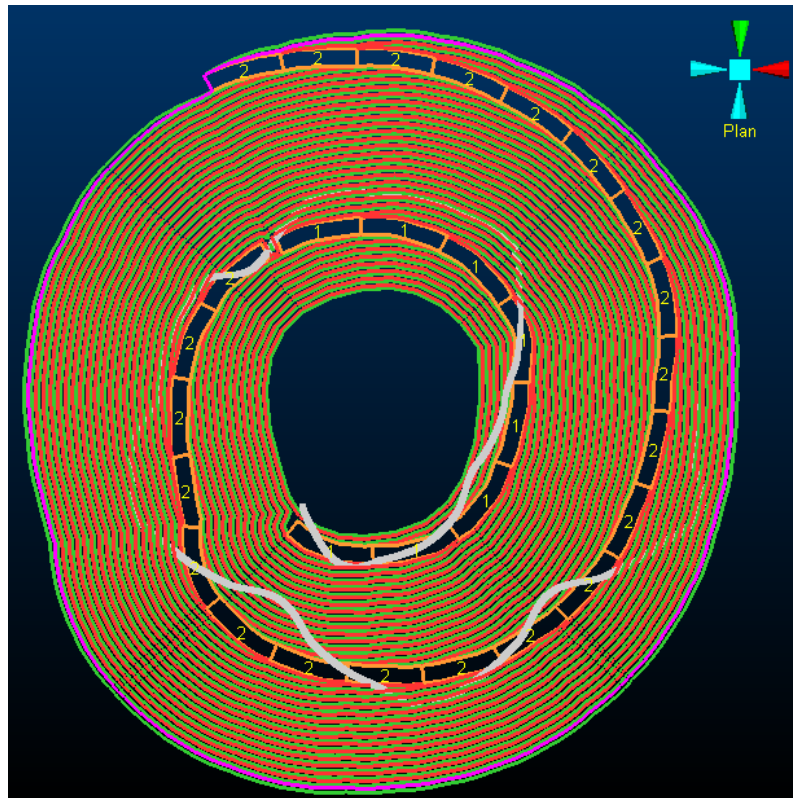


Figura 24: Vista planta ajuste pit suavizado y línea de puntos.

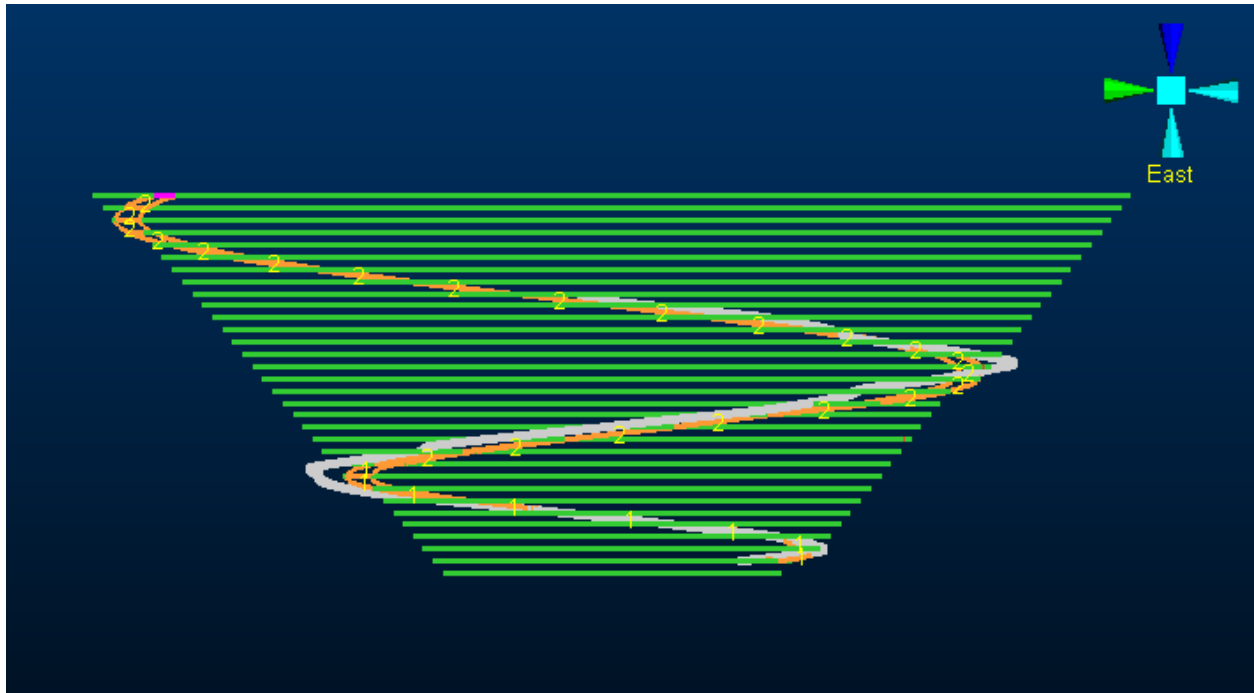


Figura 25: Vista este ajuste pit suavizado y línea de puntos.

La Figura 26 muestra una vista isométrica del pit suavizado, por otro lado, las Figuras 27 y 28 muestran el ajuste que existe entre el pit suavizado y el pit final a soporte de bloques en cortes Norte-Sur y Oeste-Este respectivamente.

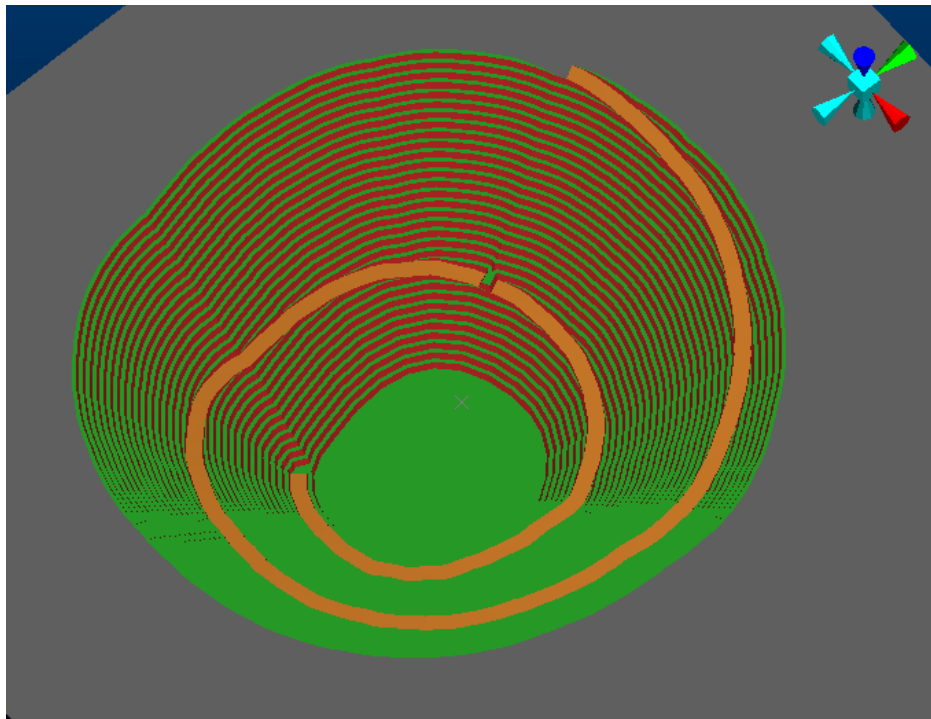


Figura 26: Diseño semiautomático de rampa suavizado, vista isométrica.

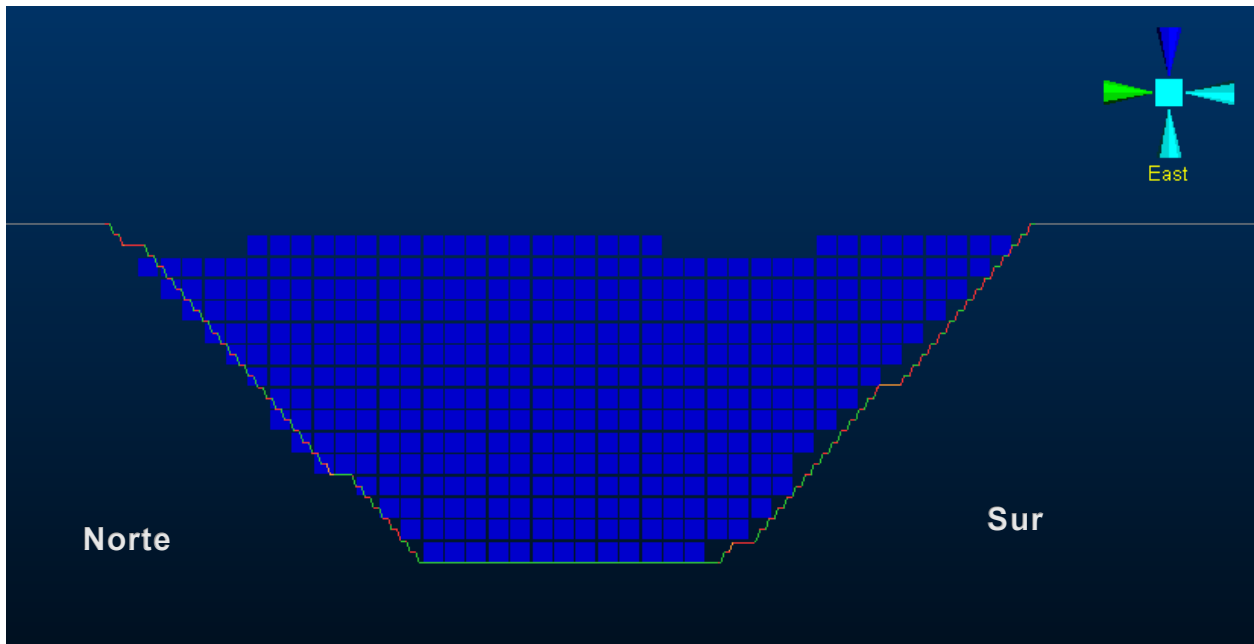


Figura 27: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte norte-sur.

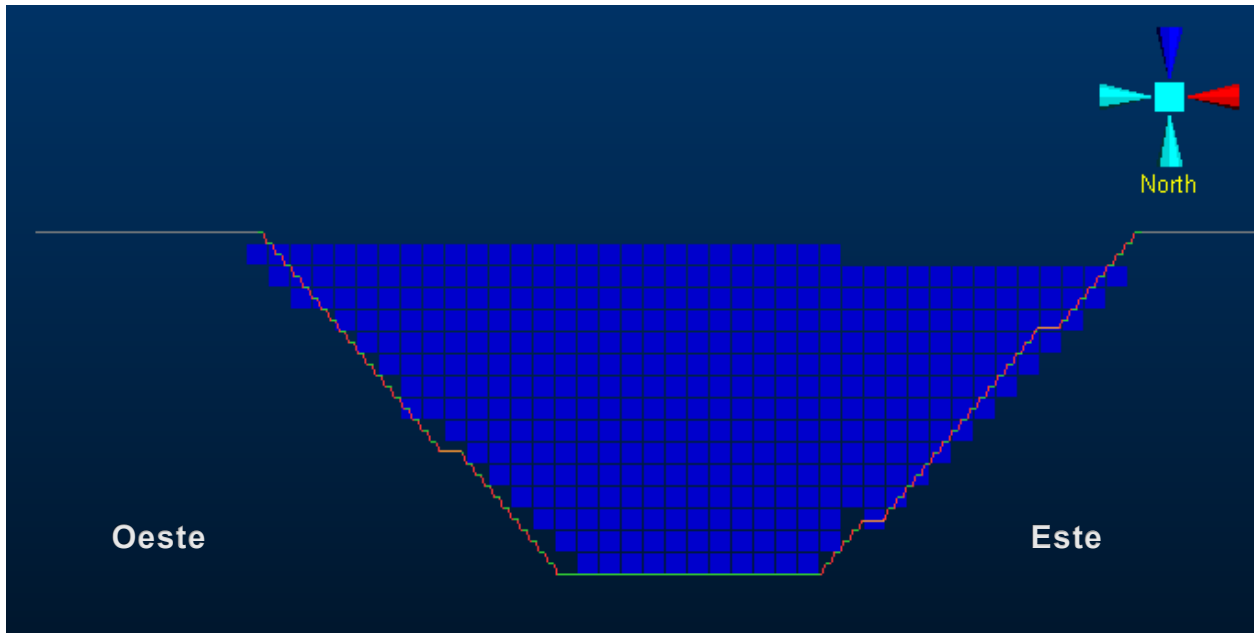
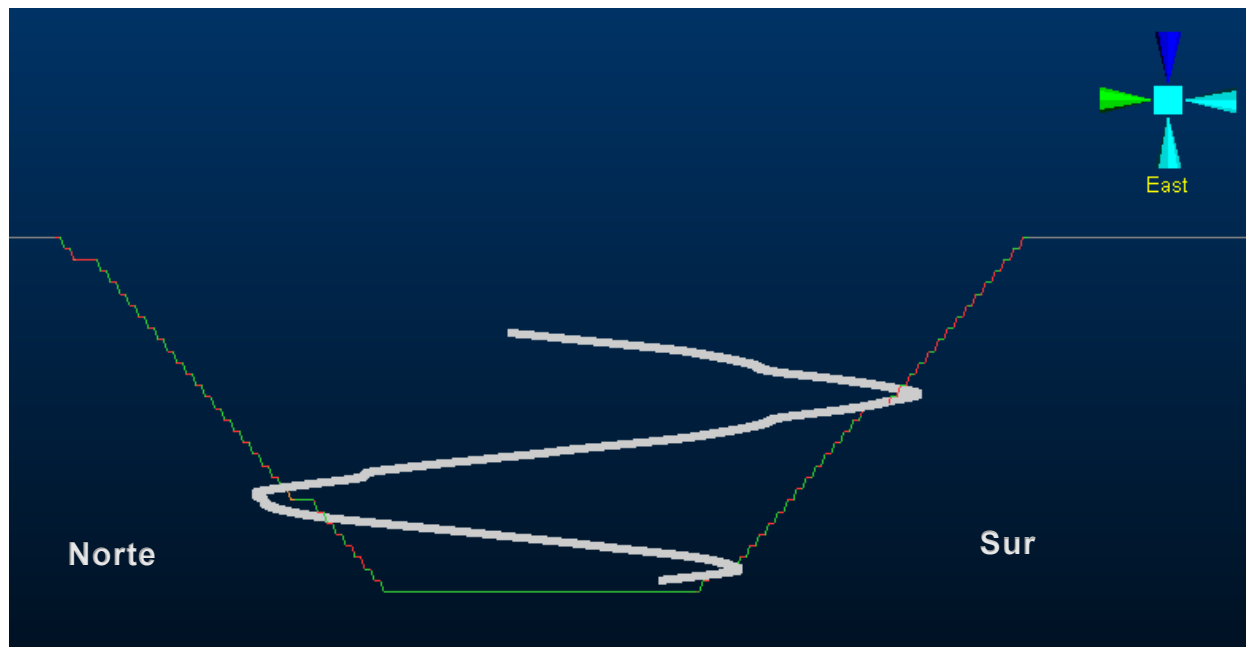
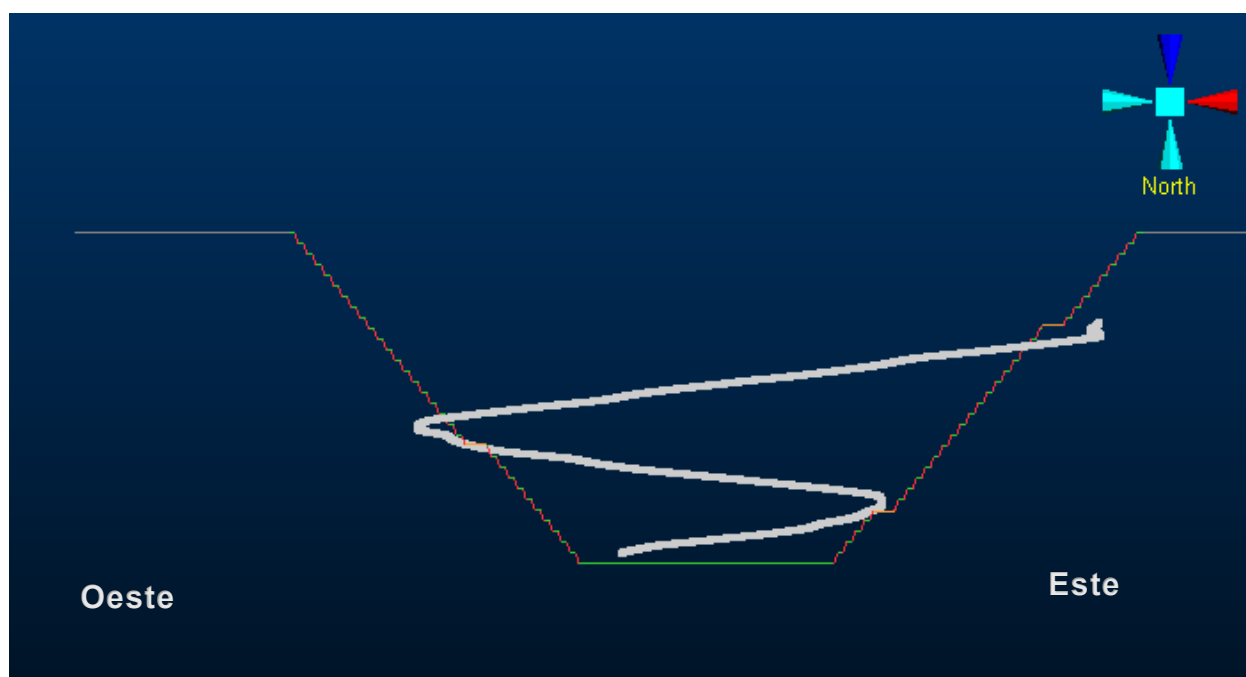


Figura 28: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte oeste-este.

Para una mejor visualización del diseño, se presenta la Figura 29, que muestra el corte Norte-Sur del pit suavizado y como ajusta con la rampa de línea de puntos, por otro lado, la Figura 30 presenta el corte Oeste-Este del mismo diseño bajo la misma configuración.



*Figura 29: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte norte-sur.*



*Figura 30: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte oeste-este.*

Al igual que en los casos anteriores el suavizado no reproduce de manera íntegra la geometría definida por la rampa a soporte de bloques. Esto se debe a la complejidad de adaptar trazados con radios pequeños y cambios bruscos. Adicionalmente, la Tabla 16 presenta el comportamiento del ángulo global resultante para cada pared.

*Tabla 16: Ángulo caras diseño EastNeg semiautomático.*

| Cara     | Angulo (°) |
|----------|------------|
| Norte    | 47.15      |
| Sur      | 46.47      |
| Este     | 47.15      |
| Oeste    | 48.44      |
| Noreste  | 47.40      |
| Suroeste | 46.23      |
| Noroeste | 48.32      |
| Sureste  | 47.20      |

Por último, en la Tabla 17 se presentan los resultados de la cubicación del diseño EastNeg semiautomático suavizado.

*Tabla 17: Cubicación diseño EastNeg semiautomático.*

| Resultado                        | Diseño semiautomático | Unidad |
|----------------------------------|-----------------------|--------|
| Tonelaje total                   | 550.631               | Mt     |
| Tonelaje mineral                 | 316.476               | Mt     |
| Ley media cu equivalente mineral | 1.00                  | %      |
| Fino cobre equivalente           | 3.164                 | Mt     |
| Tonelaje estéril                 | 234.155               | Mt     |
| Razón estéril/mineral            | 0.739                 | -      |
| Beneficio mineral                | 1,618.641             | MUSD   |
| Beneficio estéril                | -210.739              | MUSD   |
| Beneficio total                  | 1,407.901             | MUSD   |

#### 4.3.4 SouthPos

A continuación, se presentan los parámetros geométricos considerados en el pit suavizado para el caso SouthPos. Al igual que los anteriores incluye el ancho de rampa, el ángulo de cara de banco, el ancho de berma, la altura de banco y la pendiente de la rampa, los cuales definen las condiciones geométricas y operacionales del diseño final. La Tabla 18 muestra que en este caso se cambió el ángulo cara banco que aumento a  $76^\circ$  y se hizo uso de una rampa de  $11^\circ$  de pendiente.

Tabla 18: Parámetros geométricos SouthPos.

| Parámetros         | Valor | Unidad |
|--------------------|-------|--------|
| Ancho de berma     | 7.5   | m      |
| Altura banco       | 15    | m      |
| Ancho de rampa     | 30    | m      |
| Ángulo cara-banco  | 72    | °      |
| Ángulo inter-rampa | 50.5  | °      |
| Pendiente 1        | 11    | %      |
| Pendiente 2        | 12    | %      |

En la Figura 17 se muestra una vista planta del pit suavizado y la línea blanca representa el recorrido ideal realizado por el diseño semiautomático, por otro lado, la Figura 18 muestra lo mismo, pero desde una vista este.

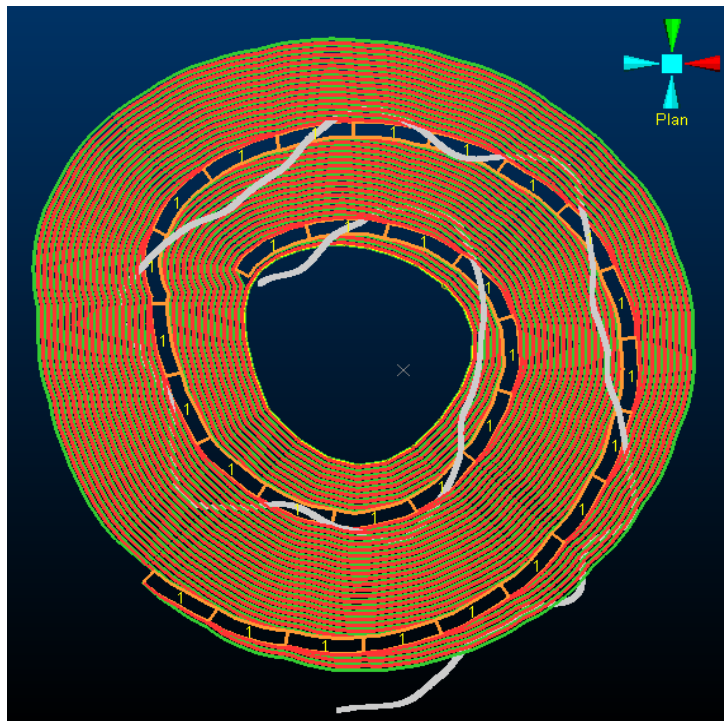


Figura 31: Vista planta ajuste pit suavizado y línea de puntos.

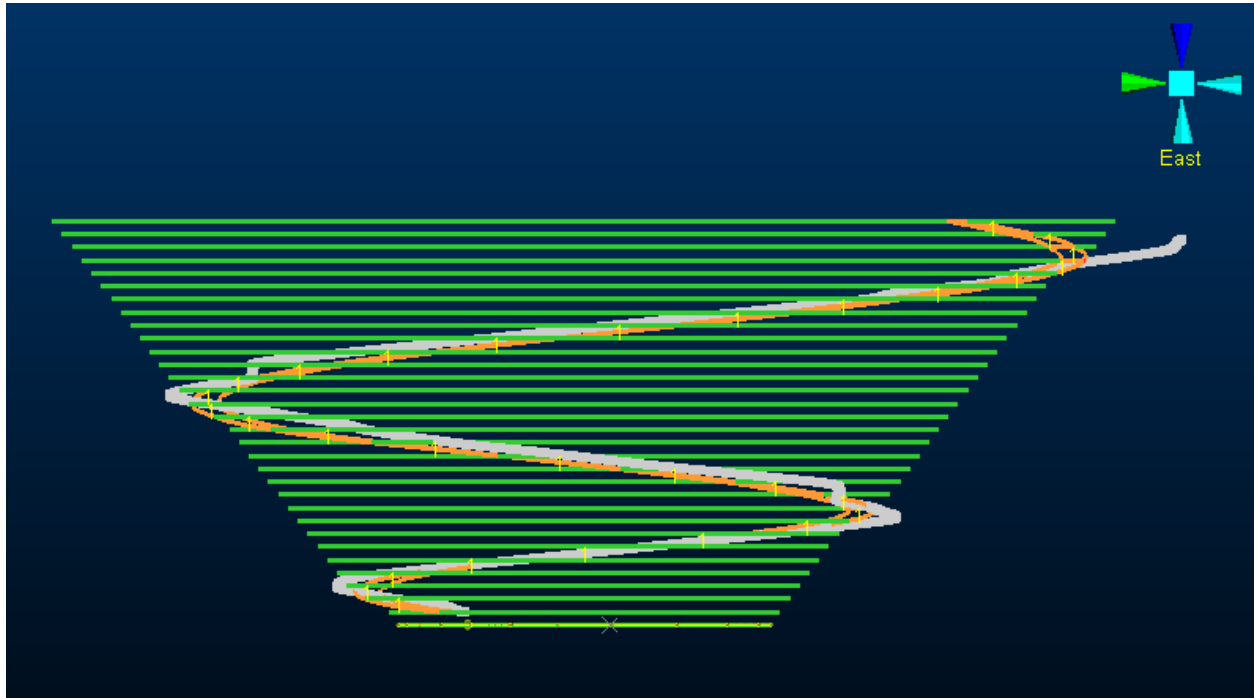


Figura 32: Vista este ajuste pit suavizado y línea de puntos.

La Figura 33 muestra una vista isométrica del pit suavizado por otro lado, las Figuras 34 y 35 muestran el ajuste que existe entre el pit suavizado y el pit final a soporte de bloques en cortes Norte-Sur y Oeste-Este respectivamente.

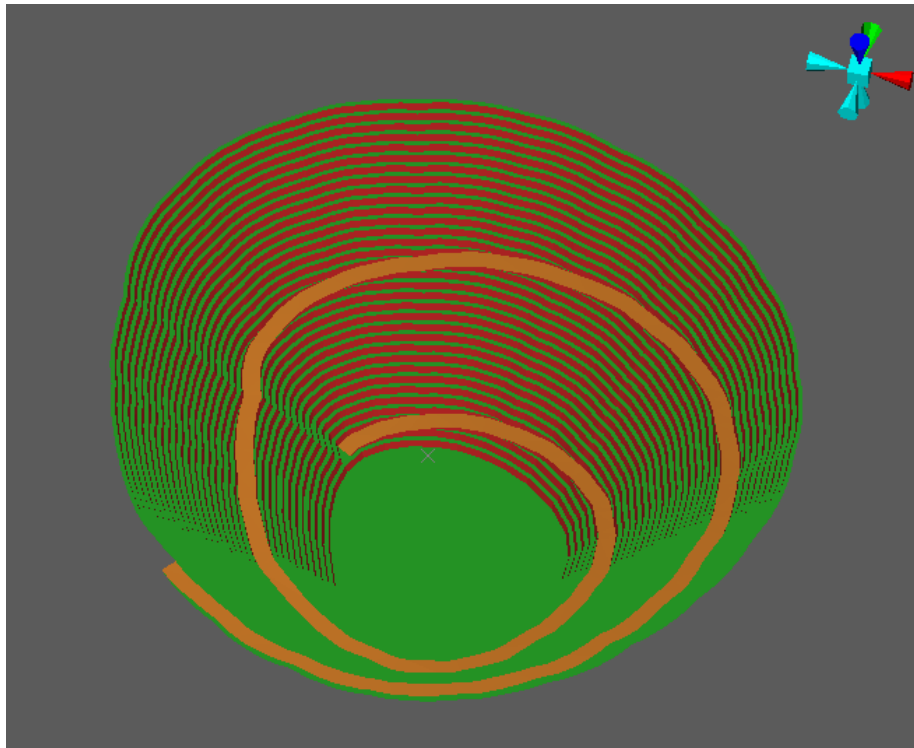


Figura 33: Diseño semiautomático de rampa suavizado, vista isométrica.

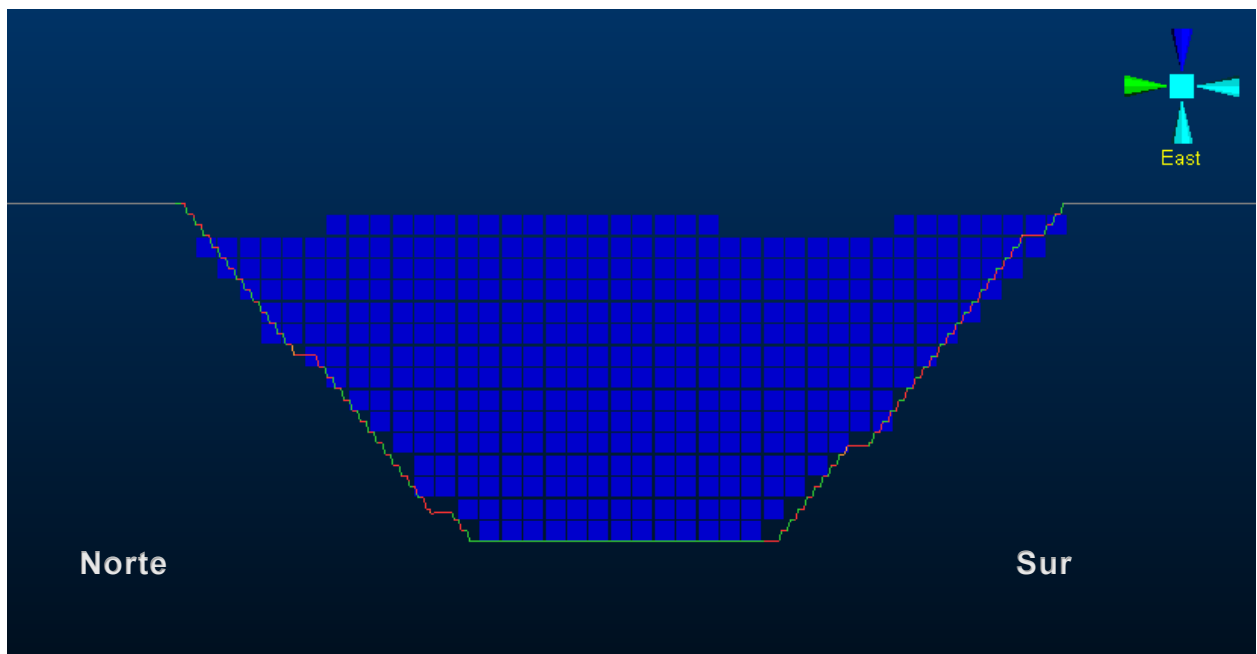


Figura 34: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte norte-sur.

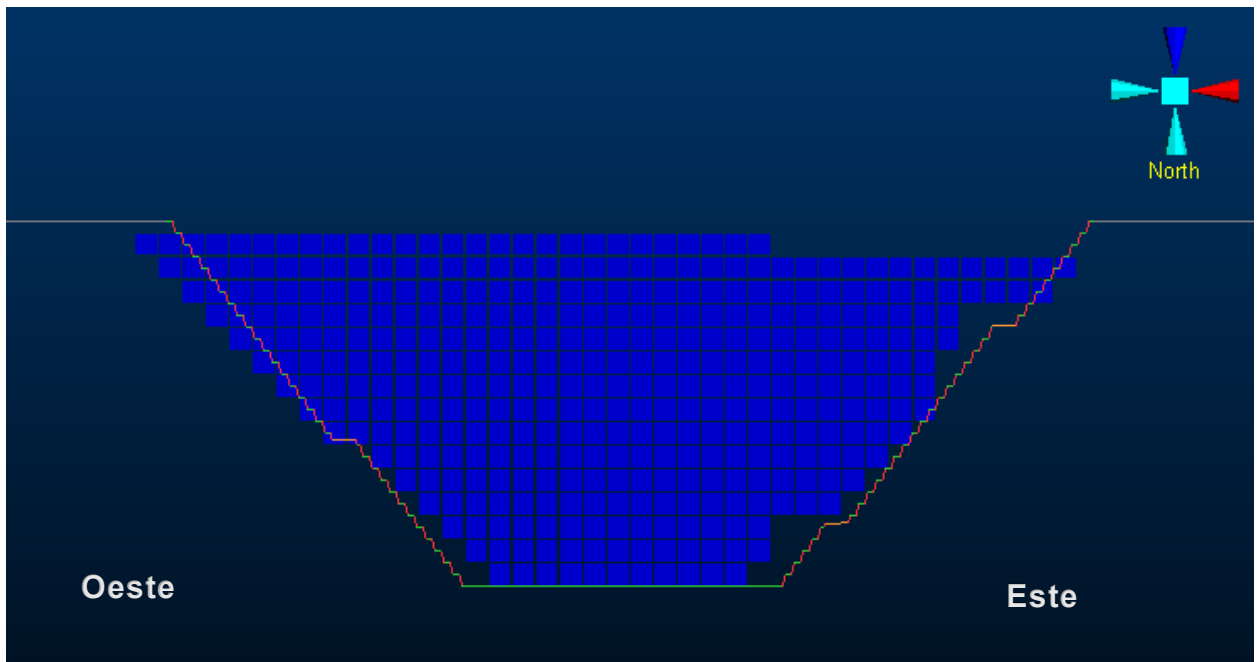


Figura 35: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte norte-sur.

A modo de una mejor visualización del diseño, se presenta la Figura 36, que muestra el corte Norte-Sur del pit suavizado con la rampa de línea de puntos, por otro lado, la Figura 37 presenta el corte Oeste-Este del mismo diseño bajo la misma configuración.

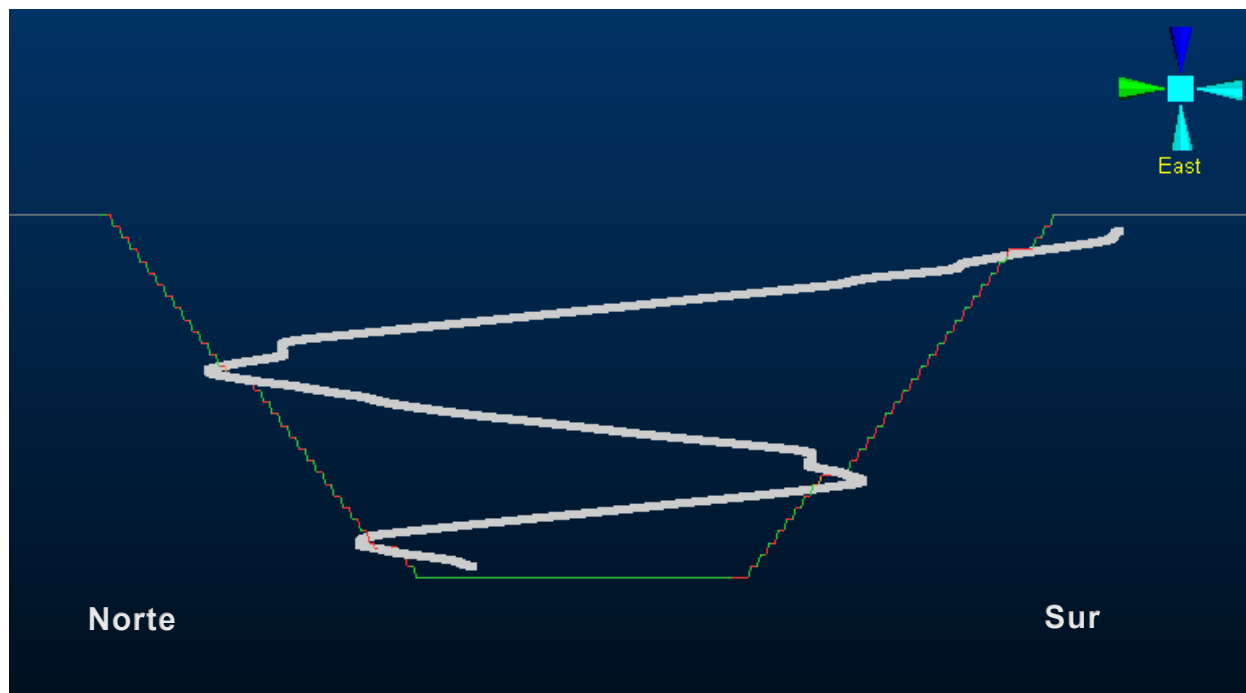


Figura 36: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte norte-sur.

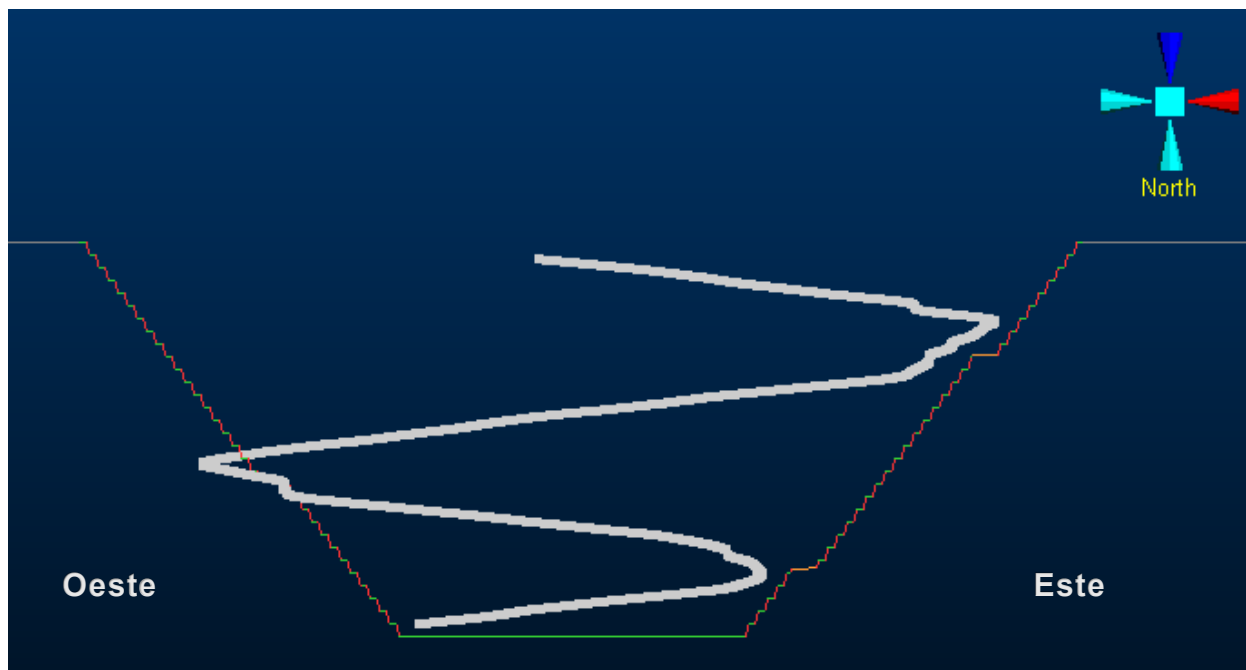


Figura 37: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte oeste-este.

Al igual que en los casos anteriores el suavizado no reproduce de manera íntegra la geometría definida por la rampa a soporte de bloques. Esto se debe a la complejidad de adaptar trazados con radios pequeños y cambios bruscos. Adicionalmente, la Tabla 19 presenta el comportamiento del ángulo global resultante para cada pared.

*Tabla 19: Ángulo caras diseño SouthPos semiautomático*

| Cara     | Angulo (°) |
|----------|------------|
| Norte    | 48.97      |
| Sur      | 49.47      |
| Este     | 49.08      |
| Oeste    | 50.80      |
| Noreste  | 49.34      |
| Suroeste | 50.99      |
| Noroeste | 48.67      |
| Sureste  | 49.69      |

Por último, en la Tabla 20 se presentan los resultados de la cubicación del diseño SouthPos semiautomático suavizado.

*Tabla 20: Cubicación diseño SouthPos semiautomático*

| Resultado                        | Diseño semiautomático | Unidad |
|----------------------------------|-----------------------|--------|
| Tonelaje total                   | 532.271               | Mt     |
| Tonelaje mineral                 | 311.952               | Mt     |
| Ley media cu equivalente mineral | 1.01                  | %      |
| Fino cobre equivalente           | 3.150                 | Mt     |
| Tonelaje estéril                 | 220.319               | Mt     |
| Razón estéril/mineral            | 0.706                 | -      |
| Beneficio mineral                | 1,607.065             | MUSD   |
| Beneficio estéril                | -198.287              | MUSD   |
| Beneficio total                  | 1,408.777             | MUSD   |

### 4.3.5 WestNeg

A continuación, se presentan los parámetros geométricos considerados en el pit suavizado, para el caso WestNeg. Al igual que los anteriores incluye el ancho de rampa, el ángulo de cara de banco, el ancho de berma, la altura de banco y la pendiente de la rampa, los cuales definen las condiciones geométricas y operacionales del diseño final. La Tabla 21 muestra que en este caso se cambió el ángulo cara banco a  $72^\circ$  y se hizo uso de dos rampas la primera de  $12^\circ$  hasta la cota 210 y la segunda de  $11^\circ$ , además de que nuevamente la rampa a soporte de bloques no abarca la totalidad del pit.

Tabla 21: Parámetros geométricos WestNeg.

| Parámetros         | Valor | Unidad |
|--------------------|-------|--------|
| Ancho de berma     | 7.5   | m      |
| Altura banco       | 15    | m      |
| Ancho de rampa     | 30    | m      |
| Ángulo cara-banco  | 72    | °      |
| Ángulo inter-rampa | 50.5  | °      |
| Pendiente 1        | 12    | %      |
| Pendiente 2        | 11    | %      |

En la Figura 38 se muestra una vista planta del pit suavizado y la línea blanca representa el recorrido ideal realizado por el diseño semiautomático, por otro lado, la Figura 39 muestra lo mismo, pero desde una vista este.

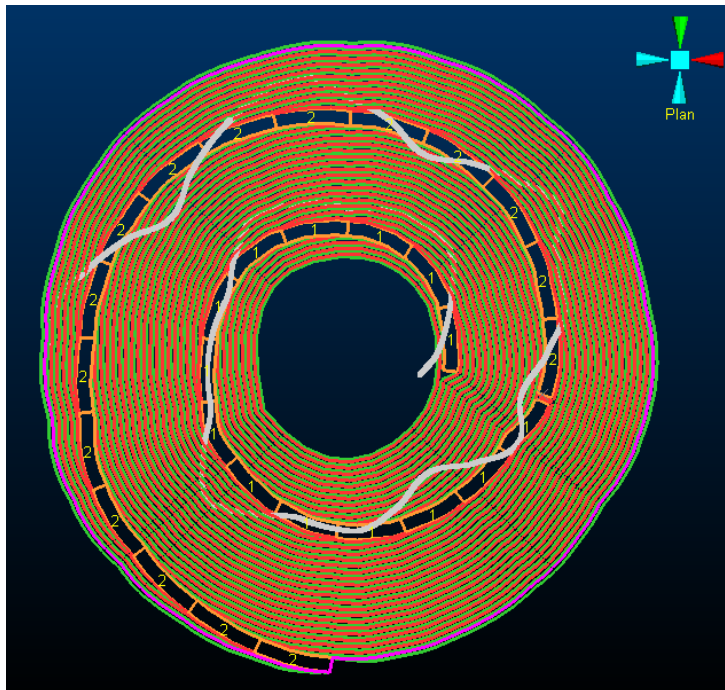


Figura 38: Vista planta ajuste pit suavizado y línea de puntos.

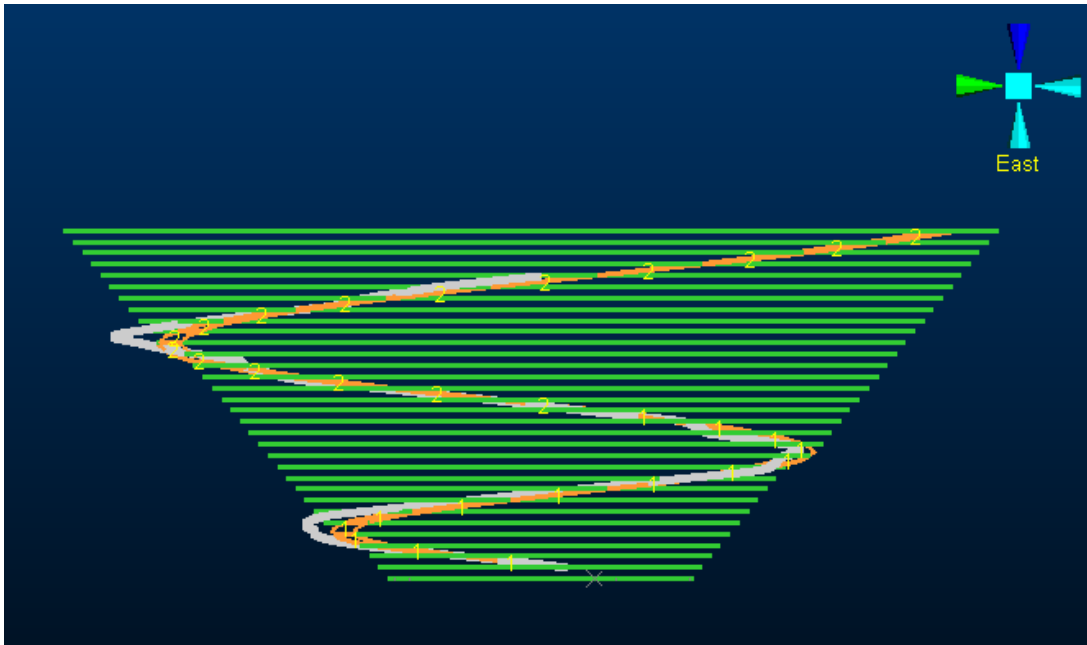


Figura 39: Vista este ajuste pit suavizado y línea de puntos.

La Figura 40 muestra una vista isométrica del pit suavizado por otro lado, las Figuras 41 y 42 muestran el ajuste que existe entre el pit suavizado y el pit final a soporte de bloques en cortes Norte-Sur y Oeste-Este respectivamente.

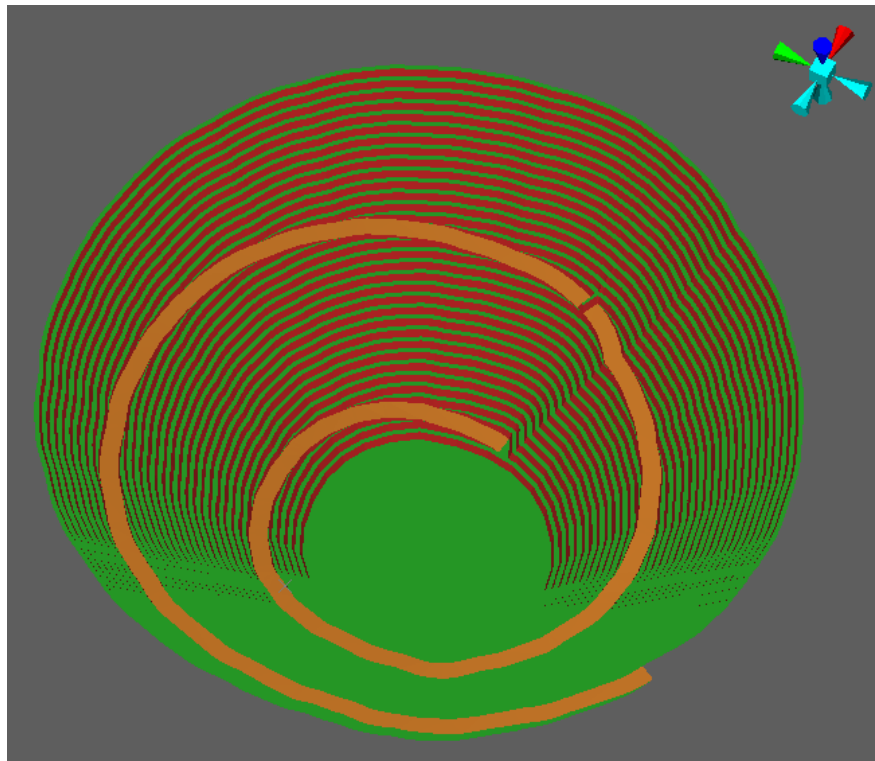


Figura 40: Diseño semiautomático de rampa suavizado, vista isométrica.

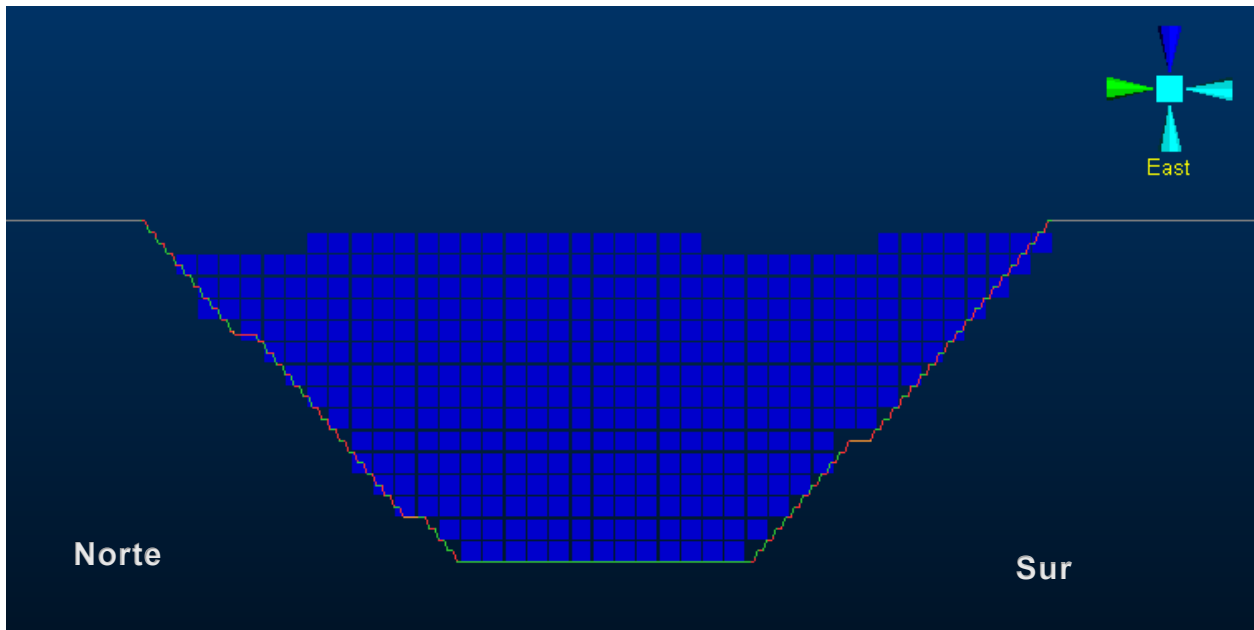


Figura 41: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte norte-sur.

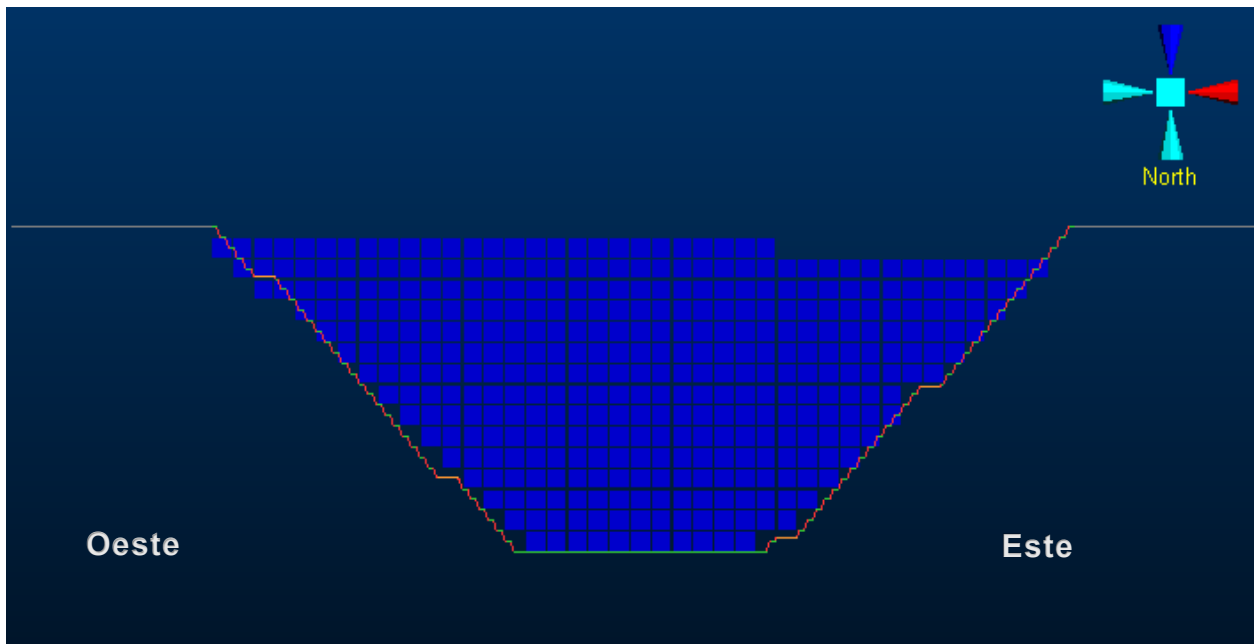


Figura 42: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte oeste-este.

A modo de una mejor visualización, se presenta la Figura 43, que muestra el corte Norte-Sur del pit suavizado y su ajuste con la rampa de línea de puntos, por otro lado, la Figura 44, que presenta el corte Oeste-Este del mismo diseño bajo la misma configuración.

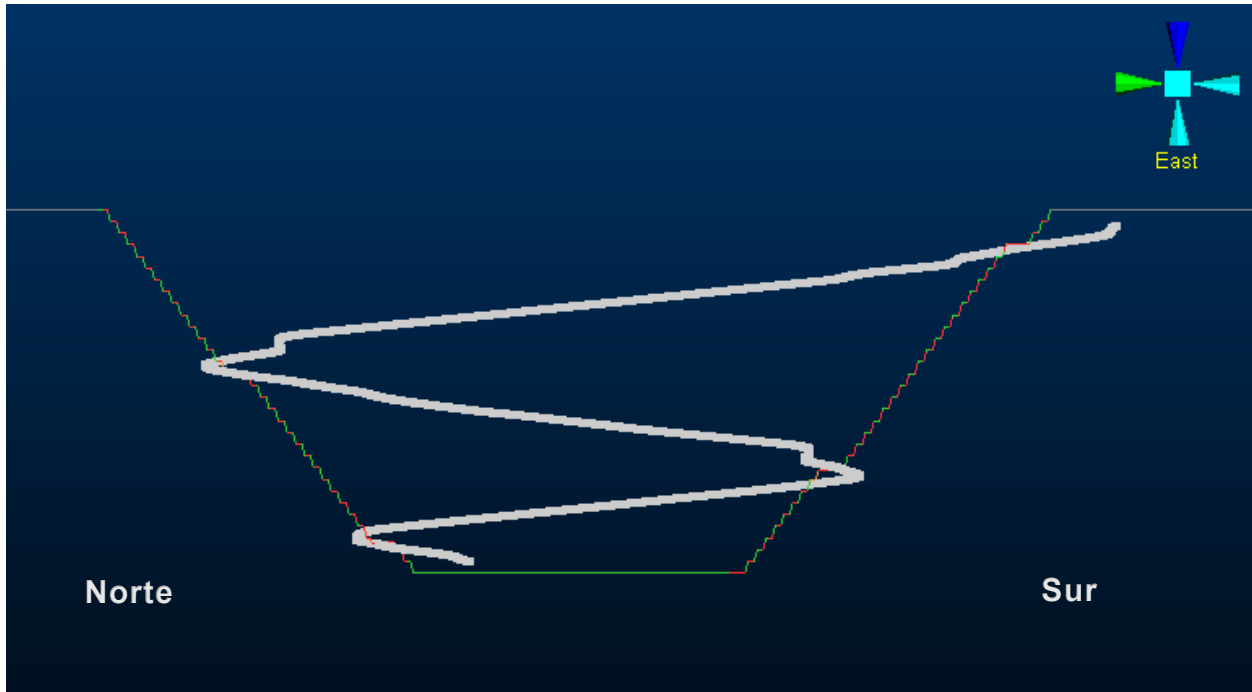


Figura 43: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte norte-sur.

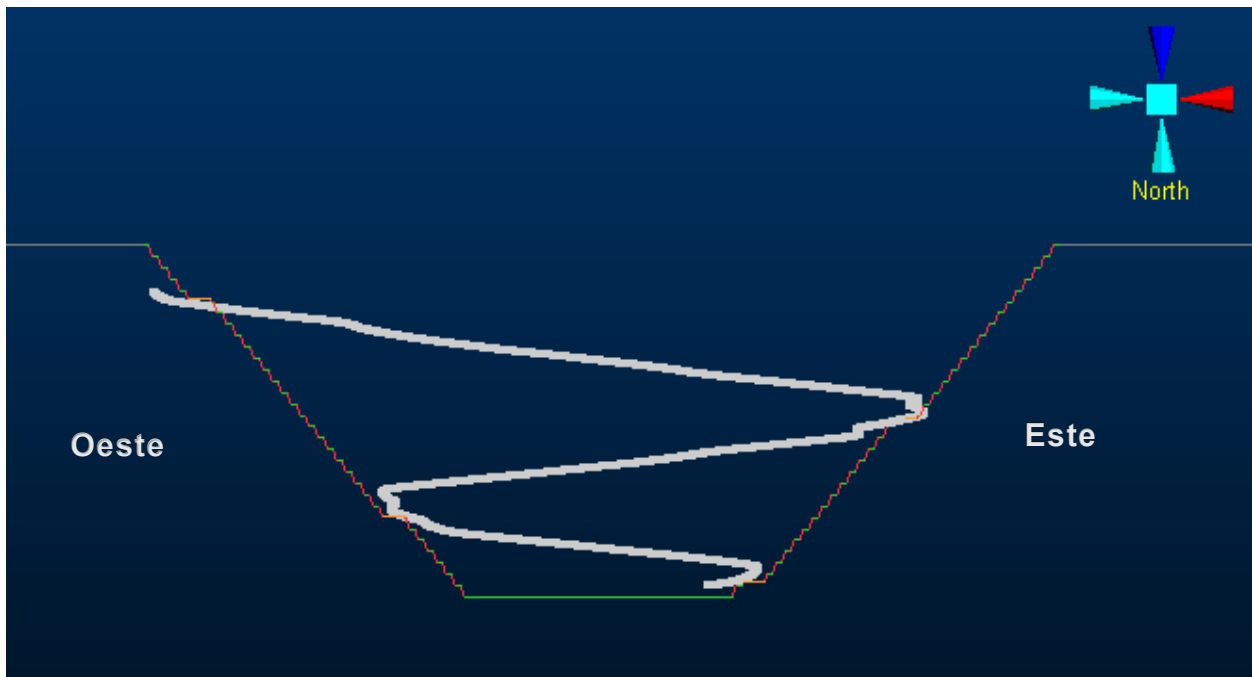


Figura 44: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte oeste-este.

Al igual que en los casos anteriores el suavizado no reproduce de manera íntegra la geometría definida por la rampa a soporte de bloques. Esto se debe a la complejidad de adaptar trazados con radios pequeños y cambios bruscos. Adicionalmente, la Tabla 22 presenta el comportamiento del ángulo global resultante para cada pared.

*Tabla 22: Ángulo caras diseño WestNeg semiautomático.*

| Cara     | Angulo (°) |
|----------|------------|
| Norte    | 47.37      |
| Sur      | 49.31      |
| Este     | 46.03      |
| Oeste    | 46.72      |
| Noreste  | 46.91      |
| Suroeste | 47.59      |
| Noroeste | 47.82      |
| Sureste  | 48.35      |

Por último, en la Tabla 23 se presentan los resultados de la cubicación del diseño WestNeg semiautomático suavizado.

*Tabla 23: Cubicación diseño WestNeg semiautomático.*

| Resultado                        | Diseño semiautomático | Unidad |
|----------------------------------|-----------------------|--------|
| Tonelaje total                   | 539.938               | Mt     |
| Tonelaje mineral                 | 311.724               | Mt     |
| Ley media cu equivalente mineral | 1.01                  | %      |
| Fino cobre equivalente           | 3.148                 | Mt     |
| Tonelaje estéril                 | 228.214               | Mt     |
| Razón estéril/mineral            | 0.732                 | -      |
| Beneficio mineral                | 1,606.932             | MUSD   |
| Beneficio estéril                | -205.393              | MUSD   |
| Beneficio total                  | 1,401.539             | MUSD   |

#### 4.4. Análisis de resultados

A partir de ambas metodologías es posible efectuar una comparación de carácter técnico y económico. Para ello, se adopta como referencia el pit final obtenido UPIT, se contrastan los resultados de los diseños a soporte de bloques con el pit del caso respectivo y con el pit suavizado correspondiente al diseño semiautomático.

##### 4.4.1 Best

A continuación, en la Tabla 24 se muestra la cubicación correspondiente al caso Best, utilizada como base para el análisis de estos resultados, por otro lado, las Tablas 25 y 26 muestran los beneficios y ángulos obtenidos.

Tabla 24: Comparación de tonelaje entre pits finales y diseño semiautomático.

| Resultado                     | UPIT    | Best    | semiautomático | Unidad |
|-------------------------------|---------|---------|----------------|--------|
| Tonelaje Total                | 527.146 | 527.855 | 526.116        | Mt     |
| Diferencia                    | 0       | 0.13    | -0.20          | %      |
| Tonelaje mineral              | 308.863 | 308.143 | 310.208        | Mt     |
| Diferencia                    | 0       | -0.24   | +0.43          | %      |
| Ley media equivalente mineral | 0.892   | 0.888   | 1.01           | %      |
| Fino equivalente              | 2.755   | 2.737   | 3.133          | Mt     |
| Diferencia                    | 0       | -0.26   | +13.72         | %      |
| Tonelaje estéril              | 218.282 | 219.711 | 215.835        | Mt     |
| Diferencia                    | 0       | +0.65   | -1.13          | %      |
| Razón estéril/mineral         | 0.706   | 0.713   | 0.695          | -      |

El análisis muestra que la incorporación de la rampa a nivel de bloques genera cambios menores en los tonelajes, caracterizados por un aumento del estéril del 0.65% y una ligera pérdida de mineral del 0.24%. En contraste, el suavizado semiautomático introduce ajustes más significativos, reduciendo el estéril en 1.13 %, aumentando el mineral en 0.43 % y mejorando la razón estéril/mineral desde 0.706 a 0.695, junto con un aumento relevante del fino contenido de 13.72 %. Estos resultados evidencian el efecto positivo del suavizado operacional en la materialización del pit teórico.

Tabla 25: Comparación de beneficio entre pits finales y diseño semiautomático.

| Resultado         | UPIT      | Best      | Semiautomático | Unidad |
|-------------------|-----------|-----------|----------------|--------|
| Beneficio mineral | 1,612.109 | 1,595.715 | 1,603.536      | MUSD   |
| Diferencia        | 0         | -1.02     | -0.6           | %      |
| Beneficio estéril | -196.454  | -197.740  | -194.251       | MUSD   |
| Diferencia        | 0         | -0.65     | -1.13          | %      |
| Beneficio total   | 1,415.655 | 1,397.974 | 1,409.284      | MUSD   |
| Diferencia        | 0         | -1.25     | -0.46          | %      |

El análisis conjunto muestra que la incorporación de la rampa a nivel de bloques produce una reducción del beneficio total del 1.25 %, asociada principalmente al aumento del costo por estéril. En contraste, el suavizado semiautomático reduce este impacto, mejorando el beneficio total hasta una diferencia de solo -0.46 % respecto del UPIT. Estos resultados confirman que el suavizado operacional contribuye a una materialización económicamente más eficiente del pit teórico con rampa.

Tabla 26: Comparación entre ángulos pits finales, diseño semiautomático y teóricos.

| Resultado | UPIT  | Best  | Semiautomático | Teórico |
|-----------|-------|-------|----------------|---------|
| Norte     | 39.51 | 47.04 | 47.62          | 48.5    |
| Sur       | 46.84 | 46.75 | 49.47          | 50.2    |
| Este      | 47.02 | 44.95 | 47.35          | 48.5    |
| Oeste     | 46.93 | 45.00 | 47.23          | 48.5    |
| Noreste   | 38.17 | 46.86 | 47.40          | 48.5    |
| Suroeste  | 37.94 | 46.96 | 48.11          | 50.2    |
| Noroeste  | 45.12 | 53.95 | 48.15          | 48.5    |
| Sureste   | 44.16 | 48.79 | 48.79          | 50.2    |

La incorporación de la rampa a nivel de bloques genera un aumento generalizado de los ángulos globales respecto del UPIT. En sectores como Norte, Noreste y Suroeste, los ángulos se aproximan a los valores teóricos. No obstante, se observan aún desviaciones puntuales, como en Este y Oeste, lo que indica que el pit sigue ajustándose a la lógica del soporte de bloques, aunque condicionado por la accesibilidad.

El suavizado semiautomático permite una mayor convergencia hacia los ángulos teóricos. Los valores obtenidos en Norte, Este, Oeste y Sureste se encuentran muy próximos a los ángulos teóricos. En sectores como Sur y Suroeste, el diseño operativo alcanza diferencias menores a 1-2° respecto del valor teórico.

#### 4.4.2 NorthPos

En segundo lugar, se obtiene los datos para el caso NorthPos, la Tabla 27 muestra la comparación entre los tonelajes del UPIT, pit final del NorthPos y el pit suavizado, mientras la Tabla 28 muestras los beneficios y diferencias, además la Tabla 29 muestra los diferentes ángulos globales para estos mismos tres pits.

*Tabla 27: Comparación de tonelaje entre pits finales y diseño semiautomático.*

| Resultado                     | UPIT    | NorthPos | semiautomático | Unidad |
|-------------------------------|---------|----------|----------------|--------|
| Tonelaje Total                | 527.146 | 534.938  | 530.277        | Mt     |
| Diferencia                    | 0       | 1.47     | 0.59           | %      |
| Tonelaje mineral              | 308.863 | 307.530  | 306.881        | Mt     |
| Diferencia                    | 0       | -0.44    | -0.65          | %      |
| Ley media equivalente mineral | 0.892   | 0.889    | 1.01           | %      |
| Fino equivalente              | 2.755   | 2.734    | 3.099          | Mt     |
| Diferencia                    | 0       | -0.77    | 12.4           | %      |
| Tonelaje estéril              | 218.282 | 227.407  | 223.396        | Mt     |
| Diferencia                    | 0       | 4.18     | 2.3            | %      |
| Razón estéril/mineral         | 0.706   | 0.713    | 0.695          | -      |

El análisis muestra que la ubicación de la rampa en NorthPos genera un aumento del tonelaje de estéril a nivel de bloques de 4.18 %, con una leve pérdida de mineral del 0.44 %, incrementando la razón estéril/mineral. El suavizado semiautomático permite reducir parcialmente este efecto, disminuyendo el estéril y la razón estéril/mineral a 0.695, además de concentrar mineral de mayor ley, reflejado en el aumento del fino equivalente de 12.4 %. Estos resultados confirman que, si bien NorthPos introduce penalizaciones a nivel teórico, el suavizado operacional mejora la eficiencia del diseño final.

Tabla 28: Comparación de beneficio entre pits finales y diseños semiautomático.

| Resultado         | UPIT      | NorthPos  | Semiautomático | Unidad |
|-------------------|-----------|-----------|----------------|--------|
| Beneficio mineral | 1,612.109 | 1,595.752 | 1,593.827      | MUSD   |
| Diferencia        | 0         | -1.02     | -1.14          | %      |
| Beneficio estéril | -196.454  | -204.666  | -201.056       | MUSD   |
| Diferencia        | 0         | -4.1      | -2.34          | %      |
| Beneficio total   | 1,415.655 | 1,391.085 | 1,392.771      | MUSD   |
| Diferencia        | 0         | -1.74     | -1.62          | %      |

Esta tabla muestra que la ubicación de la rampa en NorthPos genera una reducción del beneficio total del 1.74 % a nivel de bloques, asociada principalmente a un incremento del costo por estéril de 4.1 %. El suavizado semiautomático permite atenuar este efecto, reduciendo la penalización económica hasta 1.62 %, aunque sin alcanzar los niveles del UPIT. Esto confirma que, si bien NorthPos presenta un impacto económico negativo a nivel teórico, el suavizado operacional contribuye a mejorar el desempeño económico del diseño final.

Tabla 29: Comparación de ángulos entre pits finales, diseño semiautomático y teóricos.

| Resultado | UPIT  | NorthPos | Semiautomático | Teórico |
|-----------|-------|----------|----------------|---------|
| Norte     | 39.51 | 47.02    | 45.72          | 47.8    |
| Sur       | 46.84 | 46.97    | 45.99          | 47.8    |
| Este      | 47.02 | 47.13    | 46.86          | 49.4    |
| Oeste     | 46.93 | 44.77    | 46.16          | 47.8    |
| Noreste   | 38.17 | 45.00    | 46.10          | 47.8    |
| Suroeste  | 37.94 | 44.93    | 45.93          | 47.8    |
| Noroeste  | 45.12 | 47.01    | 45.94          | 47.8    |
| Sureste   | 44.16 | 46.20    | 47.09          | 49.4    |

La incorporación de la rampa en la posición NorthPos incrementa los ángulos globales en la mayoría de las direcciones. Valores como Norte, Este y Noroeste se aproximan al ángulo teórico de 47.8°. Sin embargo, se mantienen desviaciones en sectores como Oeste y Noreste, indicando que el pit a soporte de bloques aún presenta limitaciones geométricas asociadas a la ubicación de la rampa.

El suavizado semiautomático permite una mayor homogenización de los ángulos globales. Los valores obtenidos en Noreste, Suroeste y Noroeste reducen las diferencias respecto del ángulo teórico, mientras que el sector Sureste se aproxima al valor teórico de 49.4°. No obstante, persisten diferencias de 1° a 3° en algunas direcciones, atribuibles a ajustes geométricos propios del diseño operativo

#### 4.4.3 EastNeg

En tercer lugar, se obtiene los datos para el caso EastNeg, la Tabla 30 muestra la comparación entre los tonelajes del UPIT, pit final del EastNeg y el pit suavizado, mientras la Tabla 31 muestran los beneficios y diferencias, además la Tabla 32 muestra los diferentes ángulos globales para estos mismos tres pits.

*Tabla 30: Comparación de tonelaje entre pits finales y diseño semiautomático.*

| Resultado                     | UPIT    | EastNeg | semiautomático | Unidad |
|-------------------------------|---------|---------|----------------|--------|
| Tonelaje Total                | 527.146 | 545.620 | 550.631        | Mt     |
| Diferencia                    | 0       | 3.50    | 4.45           | %      |
| Tonelaje mineral              | 308.863 | 308.559 | 316.476        | Mt     |
| Diferencia                    | 0       | -0.10   | 2.46           | %      |
| Ley media equivalente mineral | 0.892   | 0.889   | 1.00           | %      |
| Fino equivalente              | 2.755   | 2.732   | 3.164          | Mt     |
| Diferencia                    | 0       | -0.84   | 14.8           | %      |
| Tonelaje estéril              | 218.282 | 237.061 | 234.155        | Mt     |
| Diferencia                    | 0       | 8.60    | 7.2            | %      |
| Razón estéril/mineral         | 0.706   | 0.768   | 0.739          | -      |

El análisis conjunto muestra que la ubicación de la rampa en EastNeg genera una penalización relevante a nivel de bloques, caracterizada por un aumento significativo del estéril de 8.60 % y de la razón estéril/mineral 0.768. El suavizado semiautomático permite reducir en parte este efecto, disminuyendo la razón estéril/mineral a 0.739 y concentrando mineral de mayor ley, lo que se refleja en el aumento del tonelaje de mineral de 2.46 % y del fino equivalente de 14.8 %. No obstante, EastNeg continúa siendo uno de los escenarios con mayor sobreexcavación total.

Tabla 31: Comparación de beneficio entre pits finales y diseños semiautomático.

| Resultado         | UPIT      | EastNeg   | Semiautomático | Unidad |
|-------------------|-----------|-----------|----------------|--------|
| Beneficio mineral | 1,612.109 | 1,599.192 | 1,618.641      | MUSD   |
| Diferencia        | 0         | -0.81     | 0.40           | %      |
| Beneficio estéril | -196.454  | -213.335  | -210.739       | MUSD   |
| Diferencia        | 0         | 8.59      | 7.27           | %      |
| Beneficio total   | 1,415.655 | 1,385.837 | 1,407.901      | MUSD   |
| Diferencia        | 0         | -2.11     | -0.55          | %      |

El análisis muestra que la ubicación de la rampa en EastNeg genera una penalización económica significativa a nivel de bloques, reflejada en una disminución del beneficio total de -2.11 %, asociada principalmente al aumento del costo por estéril de 8.59 %. El suavizado semiautomático reduce esta penalización, recuperando gran parte del beneficio perdido y alcanzando una diferencia de solo 0.55 % respecto del UPIT. Esto evidencia que, pese a la sobreexcavación asociada a EastNeg, el suavizado operacional mejora sustancialmente el desempeño económico del diseño final.

Tabla 32: Comparación de ángulos entre pits finales, diseño semiautomático y teórico.

| Resultado | UPIT  | EastNeg | Semiautomático | Teórico |
|-----------|-------|---------|----------------|---------|
| Norte     | 39.51 | 47.03   | 47.15          | 47.8    |
| Sur       | 46.84 | 46.75   | 46.47          | 47.8    |
| Este      | 47.02 | 44.92   | 47.15          | 47.8    |
| Oeste     | 46.93 | 44.85   | 48.44          | 49.4    |
| Noreste   | 38.17 | 44.36   | 47.40          | 47.8    |
| Suroeste  | 37.94 | 46.03   | 46.23          | 47.8    |
| Noroeste  | 45.12 | 46.38   | 48.32          | 49.4    |
| Sureste   | 44.16 | 43.52   | 47.20          | 47.8    |

La incorporación de la rampa en la posición EastNeg incrementa los ángulos globales en la mayoría de las direcciones, aunque persisten desviaciones relevantes en algunos sectores. Valores como Norte y Suroeste se aproximan al ángulo teórico, mientras que, en Este, Oeste y Sureste se mantienen diferencias del orden de 3° a 5°, evidenciando una adaptación geométrica aún condicionada por el soporte de bloques.

El suavizado semiautomático permite una mejora significativa en la convergencia hacia los ángulos teóricos. En direcciones como Noreste, Norte y Este, los ángulos se aproximan a 47.8°, mientras que en Oeste y Noroeste se alcanzan valores cercanos al ángulo teórico de 49.4°. Persisten diferencias menores en Sur y Suroeste, del orden de 1° a 2°.

#### 4.4.4 SouthPos

En cuarto lugar, se obtiene los datos para el caso SouthPos, la Tabla 33 muestra la comparación entre los tonelajes del UPIT, pit final del SouthPos y el pit suavizado, mientras la Tabla 34 muestras los beneficios y diferencias, además la Tabla 35 muestra los diferentes ángulos globales para estos mismos tres pits.

*Tabla 33: Comparación de tonelaje entre pits finales y diseño semiautomático.*

| Resultado                     | UPIT    | SouthPos | semiautomático | Unidad |
|-------------------------------|---------|----------|----------------|--------|
| Tonelaje Total                | 527.146 | 535.049  | 532.271        | Mt     |
| Diferencia                    | 0       | 1.49     | 0.97           | %      |
| Tonelaje mineral              | 308.863 | 305.925  | 311.952        | Mt     |
| Diferencia                    | 0       | -0.96    | 1.00           | %      |
| Ley media equivalente mineral | 0.892   | 0.890    | 1.01           | %      |
| Fino equivalente              | 2.755   | 2.723    | 3.150          | Mt     |
| Diferencia                    | 0       | -1.17    | 14.33          | %      |
| Tonelaje estéril              | 218.282 | 229.117  | 220.319        | Mt     |
| Diferencia                    | 0       | 4.96     | 0.93           | %      |
| Razón estéril/mineral         | 0.706   | 0.748    | 0.706          | -      |

El análisis conjunto muestra que la ubicación de la rampa en SouthPos genera una penalización relevante a nivel de bloques, caracterizada por un aumento del estéril de 4.96 % y una disminución del mineral de 0.96 %, elevando la razón estéril/mineral a 0.748. El suavizado semiautomático permite corregir de forma efectiva este efecto, reduciendo el estéril, recuperando mineral y retornando la razón estéril/mineral al nivel del UPIT de 0.706, junto con un aumento significativo del fino contenido de 14.33 %. Esto evidencia un buen desempeño del suavizado operacional en este escenario.

Tabla 34: Comparación de beneficio entre pits finales y diseños semiautomático.

| Resultado         | UPIT      | SouthPos  | Semiautomático | Unidad |
|-------------------|-----------|-----------|----------------|--------|
| Beneficio mineral | 1,612.109 | 1,590.223 | 1,607.065      | MUSD   |
| Diferencia        | 0         | -1.36     | -0.32          | %      |
| Beneficio estéril | -196.454  | -206.205  | -198.287       | MUSD   |
| Diferencia        | 0         | -4.96     | -0.93          | %      |
| Beneficio total   | 1,415.655 | 1,384.018 | 1,408.777      | MUSD   |
| Diferencia        | 0         | -2.24     | -0.49          | %      |

El análisis conjunto muestra que la ubicación de la rampa en SouthPos genera una penalización económica a nivel de bloques, con una disminución del beneficio total de 2.24 %, asociada principalmente al aumento del costo por estéril de 4.96 %. El suavizado semiautomático permite revertir gran parte de este impacto, recuperando el beneficio total hasta una diferencia de solo 0.49 % respecto del UPIT, lo que confirma la efectividad del suavizado operacional en este escenario.

Tabla 35: Comparación de ángulos entre pits finales, diseño semiautomático y teóricos.

| Resultado | UPIT  | SouthPos | Semiautomático | Teórico |
|-----------|-------|----------|----------------|---------|
| Norte     | 39.51 | 44.88    | 48.97          | 47.8    |
| Sur       | 46.84 | 44.59    | 49.47          | 47.8    |
| Este      | 47.02 | 44.75    | 49.08          | 47.8    |
| Oeste     | 46.93 | 44.45    | 50.80          | 49.4    |
| Noreste   | 38.17 | 44.68    | 49.34          | 47.8    |
| Suroeste  | 37.94 | 46.92    | 50.99          | 49.4    |
| Noroeste  | 45.12 | 46.38    | 48.67          | 47.8    |
| Sureste   | 44.16 | 43.73    | 49.69          | 47.8    |

La incorporación de la rampa en la posición SouthPos incrementa los ángulos globales respecto del UPIT, aunque estos se mantienen aún por debajo de los valores teóricos en todas las direcciones. Los valores obtenidos en Norte, Este y Oeste muestran diferencias del orden de 3° a 5° respecto de los ángulos teóricos, evidenciando una geometría a nivel de bloques condicionada por la ubicación de la rampa.

El suavizado semiautomático genera un incremento significativo de los ángulos globales, alcanzando o superando los valores teóricos en la mayoría de las direcciones. Destacan los sectores Norte, Sur, Este y Oeste, con diferencias menores a  $\pm 1^\circ$  respecto de los valores teóricos. En sectores como Suroeste y Sureste se observan valores levemente superiores a los teóricos, asociados a ajustes geométricos propios del diseño operativo.

#### 4.4.5 WestNeg

Por último, se obtiene los datos para el caso WestNeg, la Tabla 36 muestra la comparación entre los tonelajes del UPIT, pit final del WestNeg y el pit suavizado, mientras la Tabla 37 muestras los beneficios y diferencias, además la Tabla 38 muestra los diferentes ángulos globales para estos mismos tres pits.

*Tabla 36: Comparación de tonelaje entre pits finales y diseño semiautomático.*

| Resultado                     | UPIT    | WestNeg | semiautomático | Unidad |
|-------------------------------|---------|---------|----------------|--------|
| Tonelaje Total                | 527.146 | 538.836 | 539.938        | Mt     |
| Diferencia                    | 0       | 2.21    | 2.42           | %      |
| Tonelaje mineral              | 308.863 | 308.652 | 311.724        | Mt     |
| Diferencia                    | 0       | -0.07   | 0.92           | %      |
| Ley media equivalente mineral | 0.892   | 0.889   | 1.01           | %      |
| Fino equivalente              | 2.755   | 2.745   | 3.148          | Mt     |
| Diferencia                    | 0       | -0.37   | 14.26          | %      |
| Tonelaje estéril              | 218.282 | 230.184 | 228.214        | Mt     |
| Diferencia                    | 0       | 5.45    | 4.55           | %      |
| Razón estéril/mineral         | 0.706   | 0.745   | 0.732          | -      |

El análisis de la tabla muestra que la ubicación de la rampa en WestNeg genera una penalización a nivel de bloques sobre todo por el aumento del estéril de 5.45 %, con un efecto mínimo sobre el tonelaje de mineral -0.07 %. El suavizado semiautomático permite mejorar parcialmente esta condición, reduciendo el estéril y la razón estéril/mineral a 0.732, además de concentrar mineral de mayor ley, reflejado en el aumento del fino equivalente de 14.26 %. No obstante, el escenario WestNeg continúa presentando una razón estéril/mineral superior a la del UPIT.

Tabla 37: Comparación de beneficio entre pits finales y diseño semiautomático.

| Resultado         | UPIT      | WestNeg   | Semiautomático | Unidad |
|-------------------|-----------|-----------|----------------|--------|
| Beneficio mineral | 1,612.109 | 1,602.356 | 1,606.932      | MUSD   |
| Diferencia        | 0         | -0.61     | -0.33          | %      |
| Beneficio estéril | -196.454  | -207.165  | -205.393       | MUSD   |
| Diferencia        | 0         | -5.45     | -4.55          | %      |
| Beneficio total   | 1,415.655 | 1,395.190 | 1,401.539      | MUSD   |
| Diferencia        | 0         | -1.45     | -1             | %      |

El análisis conjunto muestra que la ubicación de la rampa en WestNeg genera una pérdida económica a nivel de bloques, con una disminución del beneficio total de 1.45 %, asociada principalmente al aumento del costo por estéril de 5.45 %. El suavizado semiautomático permite atenuar este efecto, mejorando el beneficio total hasta una diferencia de 1.0 % respecto del UPIT, confirmando un efecto positivo, aunque limitado, del suavizado operacional en este escenario.

Tabla 38: Comparación de ángulos entre pits finales, diseño semiautomático y teóricos.

| Resultado | UPIT  | WestNeg | Semiautomático | Teórico |
|-----------|-------|---------|----------------|---------|
| Norte     | 39.51 | 46.97   | 47.37          | 47.8    |
| Sur       | 46.84 | 46.90   | 49.31          | 49.4    |
| Este      | 47.02 | 43.17   | 46.03          | 47.8    |
| Oeste     | 46.93 | 44.94   | 46.72          | 47.8    |
| Noreste   | 38.17 | 48.72   | 46.91          | 47.8    |
| Suroeste  | 37.94 | 46.13   | 47.59          | 47.8    |
| Noroeste  | 45.12 | 46.22   | 47.82          | 47.8    |
| Sureste   | 44.16 | 48.77   | 48.35          | 49.4    |

La incorporación de la rampa en la posición WestNeg incrementa los ángulos globales en la mayoría de las direcciones. Valores como Noreste y Sureste se aproximan o superan levemente los ángulos teóricos, mientras que en Este y Oeste se mantienen diferencias del orden de 3° a 5°, evidenciando una geometría a nivel de bloques aún condicionada por la ubicación de la rampa.

El suavizado semiautomático permite una mayor homogeneización de los ángulos globales. En direcciones como Norte, Sur, Noroeste y Suroeste, los ángulos alcanzan o se aproximan a los valores teóricos. Persisten diferencias menores en Este y Oeste, del orden de 1° a 2°, asociadas a ajustes geométricos propios del diseño operativo.

#### **4.4.6 Análisis conjunto caso de estudio N°1**

El análisis conjunto de los casos evaluados, en comparación con el escenario UPIT, permite identificar tendencias claras en el comportamiento geométrico, productivo y económico del diseño de pits al incorporar rampas y aplicar procesos de suavizado semiautomático.

Desde el punto de vista de los tonelajes, los pits a soporte de bloques con rampa presentan variaciones moderadas respecto del UPIT, con incrementos del tonelaje total generalmente inferiores al 4 % y leves disminuciones del tonelaje mineral, normalmente menores al 1 %. Estas variaciones se explican principalmente por el aumento del tonelaje de estéril asociado a la incorporación de rampas, lo que se refleja en un incremento de la razón estéril/mineral. En contraste, los diseños semiautomáticos tienden a reducir el tonelaje de estéril respecto del pit a soporte de bloques con rampa, manteniendo valores de tonelaje mineral similares o levemente superiores en algunos casos.

En términos de calidad del mineral, el suavizado semiautomático muestra un comportamiento consistente en todos los escenarios, con un aumento significativo del fino equivalente, del orden de 12 % a 15 % respecto del UPIT. Este resultado se obtiene aun cuando el tonelaje mineral no aumenta de forma proporcional, lo que indica una mayor concentración de la extracción en sectores de mayor ley, producto de una geometría más selectiva del pit suavizado.

Respecto al beneficio económico, los pits a soporte de bloques con rampa presentan una disminución del beneficio total respecto del UPIT, generalmente entre 1 % y 2 %, atribuible al mayor costo asociado al incremento de estéril. Los casos semiautomáticos permiten recuperar parte de esta pérdida, alcanzando beneficios totales más cercanos al UPIT, aunque sin superarlo de manera sistemática. Esta mejora se explica por la reducción del estéril y el aumento del fino equivalente.

En cuanto a los ángulos globales, los resultados muestran una alta variabilidad direccional, especialmente en los pits a soporte de bloques. Sin embargo, estas diferencias deben interpretarse considerando que los ángulos fueron obtenidos mediante una metodología manual, susceptible a errores de medición. En este sentido, diferencias de algunos grados entre escenarios pueden deberse más al método de medición que a cambios reales en la geometría del diseño. Los pits suavizados presentan, en general, una distribución más homogénea de ángulos y una mayor cercanía a los valores teóricos.

No obstante, el hecho de que los diseños semiautomáticos presenten sistemáticamente mejores resultados en ángulos y fino equivalente puede estar influenciado por el criterio utilizado para definir los parámetros geométricos de los pit. Esta situación puede generar pits suavizados más estrechos que los pits a soporte de bloques, provocando una disminución de estéril a extraer, haciendo que el beneficio final aumente respecto a su pit a soporte de bloques.

## 5. Caso estudio N° 2

El caso de estudio corresponde al modelo de bloques de una mina, el cual tiene como nombre "Zuck\_medium". Las características de este modelo se pueden ver en la Tabla 39.

Tabla 39: Características modelo de bloques Zuck\_medium.

|                            |         |
|----------------------------|---------|
| Tamaño de bloques en X [m] | 10      |
| Tamaño de bloques en Y [m] | 10      |
| Tamaño de bloques en Z [m] | 10      |
| Cantidad de bloques en X   | 73      |
| Cantidad de bloques en Y   | 77      |
| Cantidad de bloques en Z   | 30      |
| Cantidad total de bloques  | 153.300 |

Debido a que este segundo modelo de bloques no incorpora información de mineralización ni de leyes, no es posible realizar una estadística básica para el caso de estudio 2.

### 5.1. Pit final

A continuación, en la Figura 45 se muestra la vista en planta de los seis pits finales analizados, mientras que en la Figura 46 se presenta la vista este de estos mismos pits finales.

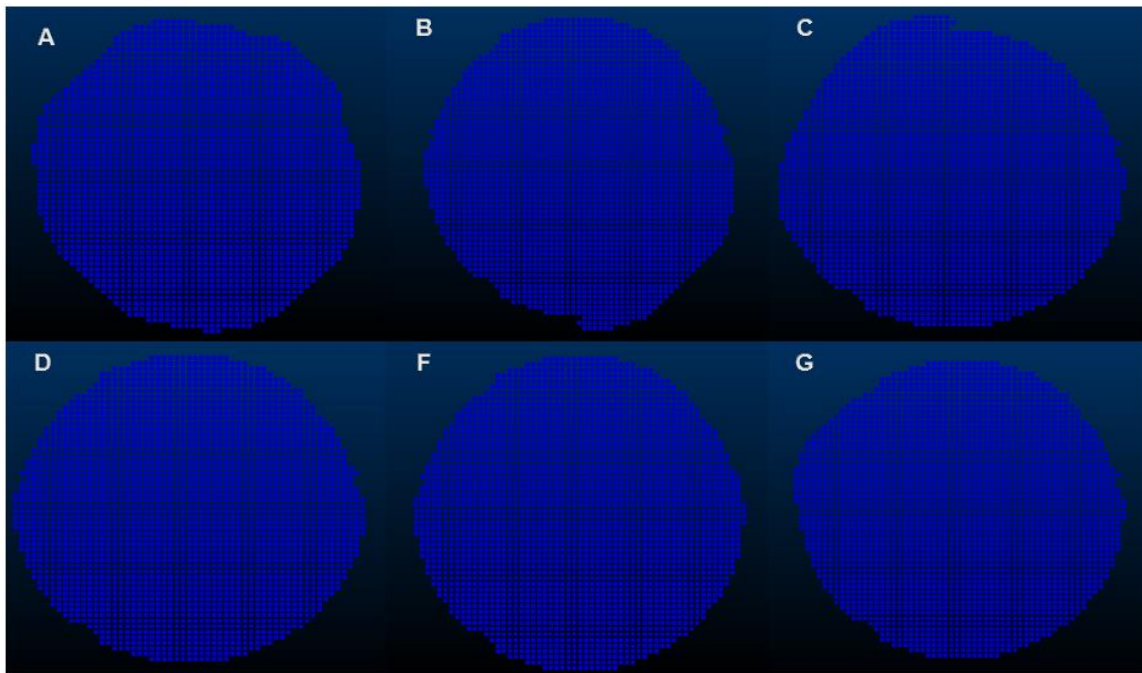


Figura 45: Vista planta pit final UPIT (A), Best (B), NorthPos (C), EastNeg (D), SouthPos (E) y WestNeg (F).

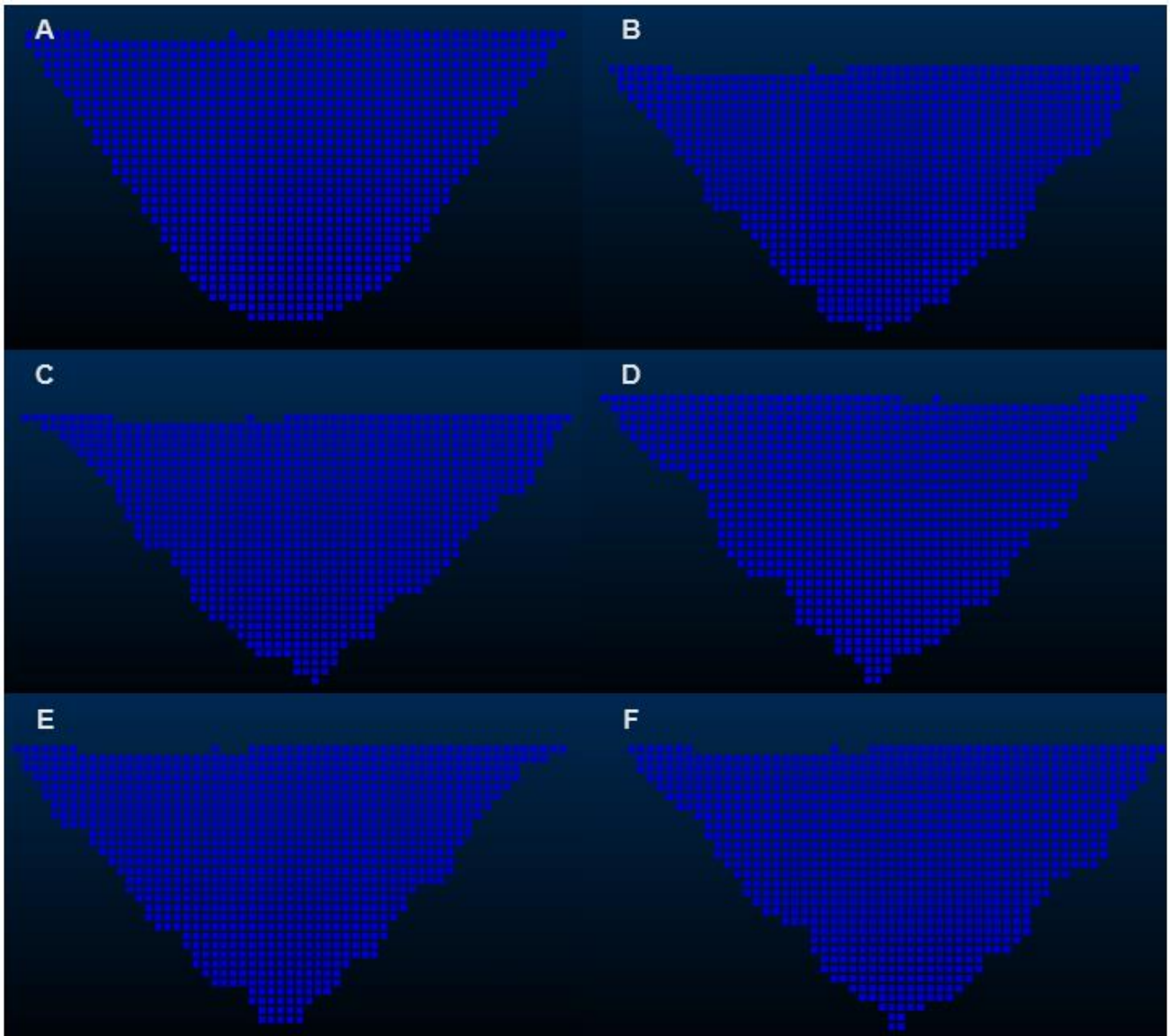


Figura 46: Vista este pit final UPIT (A), Best (B), NorthPos (C), EastNeg (D), SouthPos (E) y WestNeg (F).

A continuación, en la Tabla 40 se presentan los ocho ángulos correspondientes a las direcciones principales de los seis pits finales considerados para el análisis.

*Tabla 40: Ángulos globales pit finales caso de estudio N°2*

| Cara     | UPIT  | BestRamp | NorthPos | EastNeg | SouthPos | WestNeg |
|----------|-------|----------|----------|---------|----------|---------|
| Norte    | 52.39 | 50.51    | 46.67    | 47.90   | 48.11    | 45.55   |
| Sur      | 50.07 | 49.52    | 47.75    | 46.60   | 46.66    | 47.76   |
| Este     | 52.09 | 45.84    | 47.44    | 46.93   | 49.07    | 47.45   |
| Oeste    | 52.28 | 46.07    | 46.59    | 46.80   | 47.35    | 47.73   |
| Noreste  | 51.66 | 46.11    | 45.36    | 46.06   | 47.39    | 46.44   |
| Suroeste | 52.52 | 46.14    | 47.78    | 46.15   | 48.13    | 48.92   |
| Noroeste | 51.70 | 46.27    | 47.83    | 47.94   | 47.42    | 46.07   |
| Sureste  | 49.74 | 45.75    | 47.74    | 46.94   | 48.01    | 47.45   |

Finalmente, en la Tabla 41 se presentan las cubicaciones finales correspondientes a los seis pits considerados en el caso de estudio 2

*Tabla 41: Cubicaciones pits finales caso de estudio N°2*

| Parámetro             | UPIT   | BestRamp | NorthPos | EastNeg | SouthPos | WestNeg | Unidad |
|-----------------------|--------|----------|----------|---------|----------|---------|--------|
| Tonelaje total        | 237.94 | 220.20   | 212.58   | 208.02  | 218.33   | 212.00  | Mt     |
| Tonelaje mineral      | 105.86 | 96.15    | 92.62    | 91.37   | 95.36    | 92.88   | Mt     |
| Tonelaje estéril      | 132.07 | 124.04   | 119.96   | 116.65  | 122.97   | 119.11  | Mt     |
| Razón estéril/mineral | 1.24   | 1.29     | 1.29     | 1.27    | 1.29     | 1.28    | -      |
| Beneficio total       | 1,075  | 973      | 954      | 943     | 965      | 950     | MUSD   |

## 5.2. Resultados

Para el Caso de Estudio 2 se aplica el mismo enfoque de diseño utilizado previamente. El diseño de rampa obtenido mediante la metodología asistida se encuentra definido sobre un soporte de bloques, por lo que su resultado inicial no es directamente operativo y se usa la rampa de línea de puntos como ayuda al suavizado. En consecuencia, el diseño es suavizado mediante el software Studio OP, incorporando parámetros geométricos distintos y obteniendo nuevos tonelajes, beneficios y leyes.

### 5.2.1 Best

A continuación, y al igual que el caso anterior la Tabla 42 presenta los parámetros geométricos considerados en el pit suavizado, para este caso Best. Estos incluyen el ancho de rampa, el ángulo de cara de banco, el ancho de berma, la altura de banco y la pendiente de la rampa, los cuales definen las condiciones geométricas y operacionales del diseño final. Para este caso ángulo cara banco es de 82° y una pendiente constante de 11.5°. Además en este caso la rampa de línea de puntos no llega hasta la superficie del pit.

Tabla 42: Parámetros geométricos Best.

| Parámetros         | Valor | Unidad |
|--------------------|-------|--------|
| Ancho de berma     | 8.5   | m      |
| Altura banco       | 20    | m      |
| Ancho de rampa     | 30    | m      |
| Ángulo cara-banco  | 82    | °      |
| Ángulo inter-rampa | 60.5  | °      |
| Pendiente          | 11.5  | %      |

En la Figura 47 se muestra una vista planta del pit suavizado y la línea blanca representa el recorrido ideal realizado por el diseño semiautomático, por otro lado, la Figura 48 muestra lo mismo, pero desde una vista este.

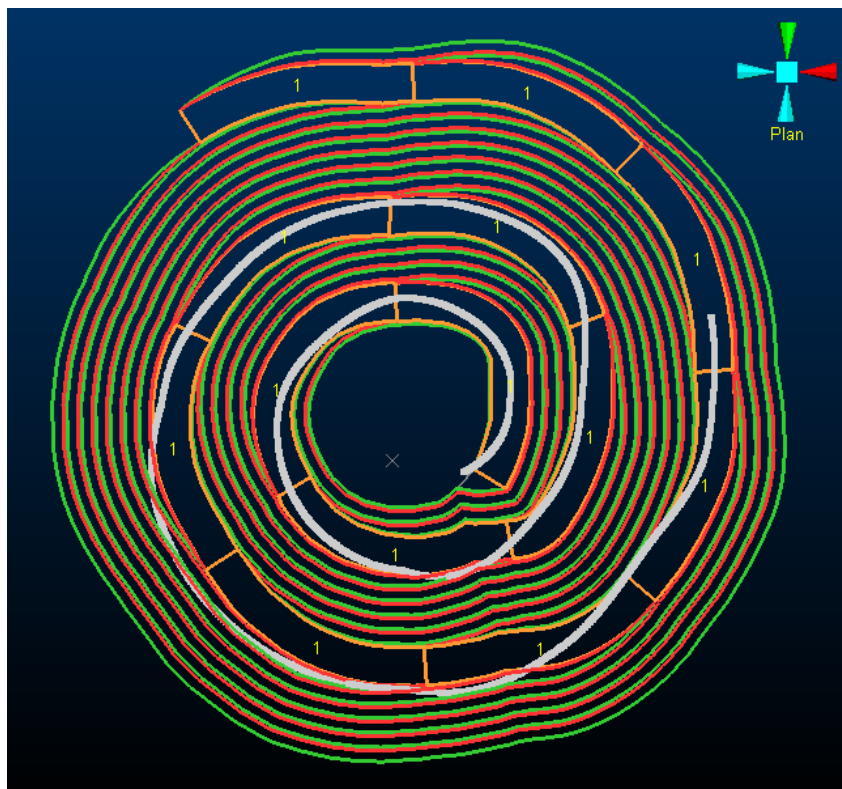


Figura 47: Vista planta ajuste pit suavizado y línea de puntos.

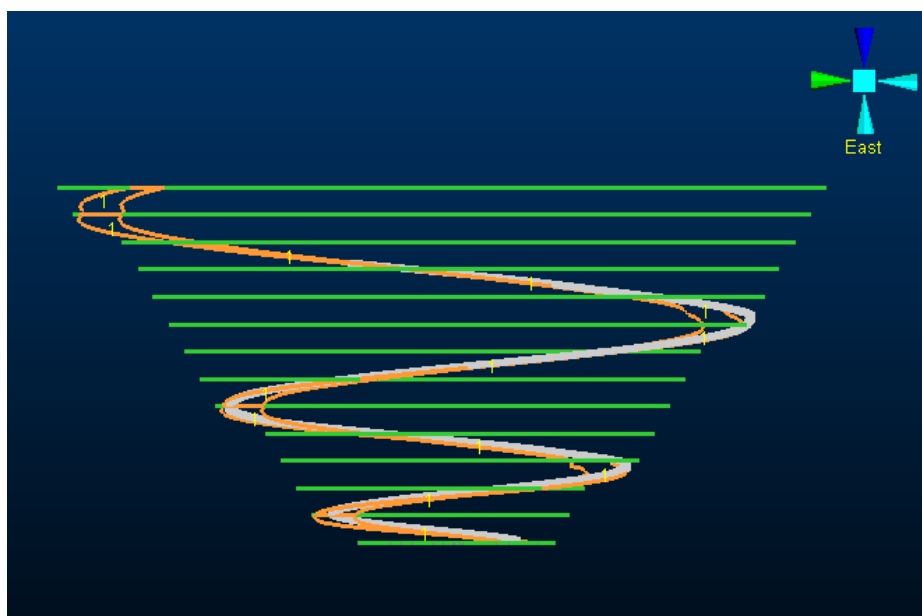


Figura 48: Vista este ajuste pit suavizado y línea de puntos.

La Figura 49 muestra una vista isométrica del pit suavizado por otro lado, las Figuras 50 y 51 muestran el ajuste que existe entre el pit suavizado y el pit final a soporte de bloques en cortes Norte-Sur y Oeste-Este respectivamente

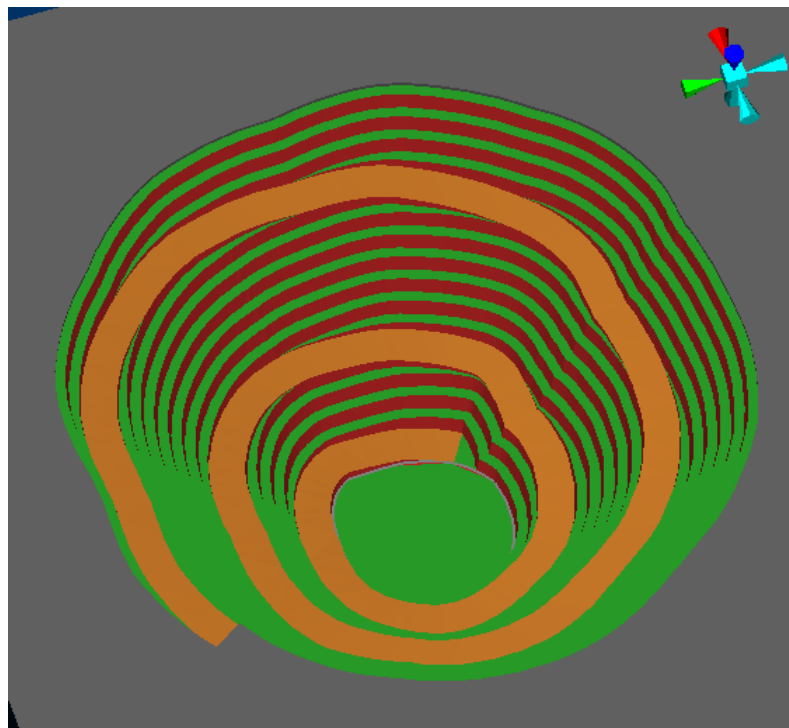


Figura 49: Diseño semiautomático de rampa suavizado, vista isométrica.

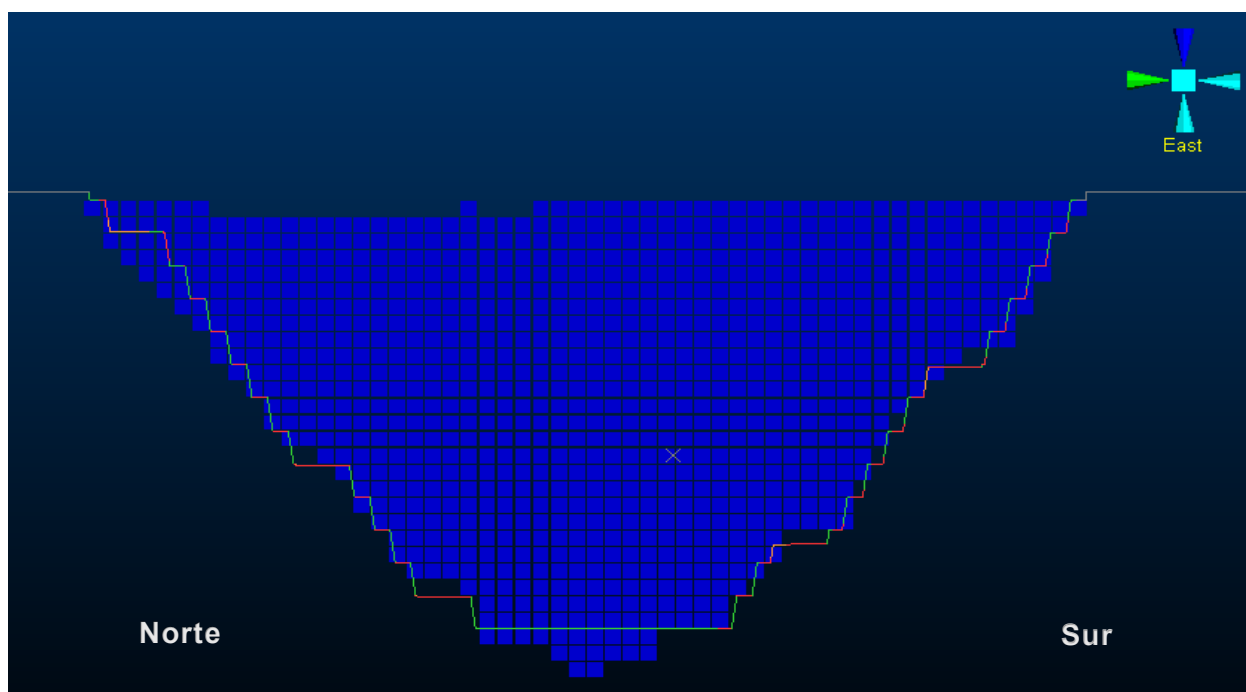


Figura 50: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte norte-sur.

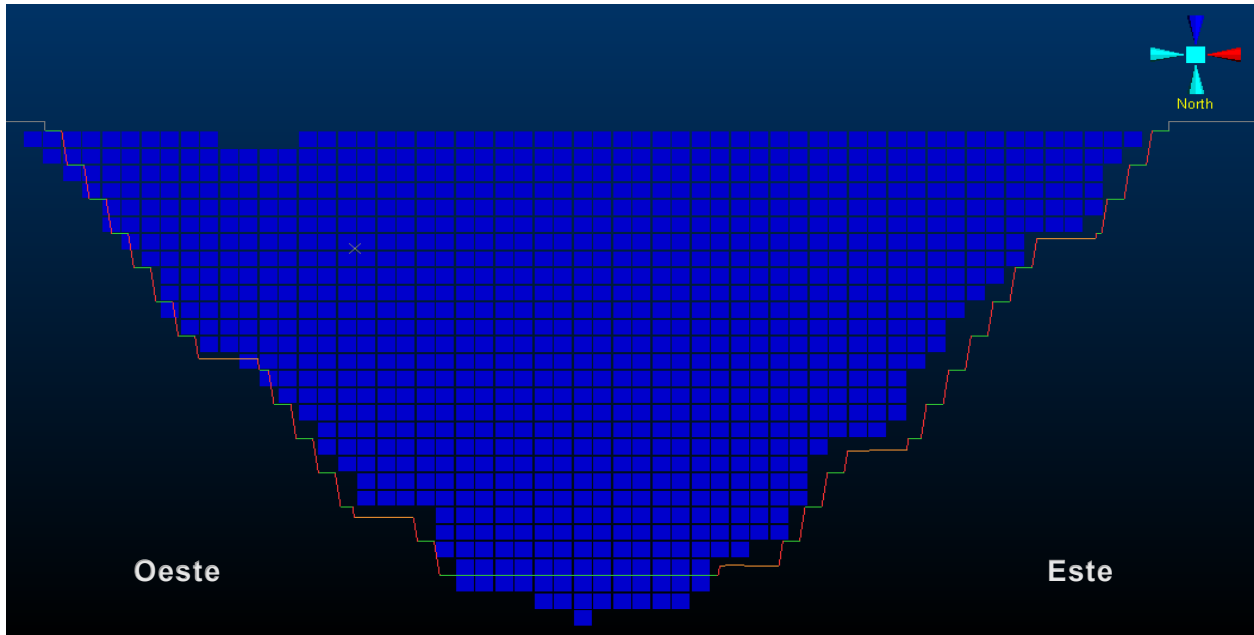


Figura 51: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte oeste-este.

A modo de una mejor visualización, se presenta la Figura 52, que muestra el corte Norte-Sur del diseño suavizado y su ajuste con la rampa de línea de puntos, y la Figura 53, que presenta el corte Oeste-Este del mismo diseño bajo la misma configuración.

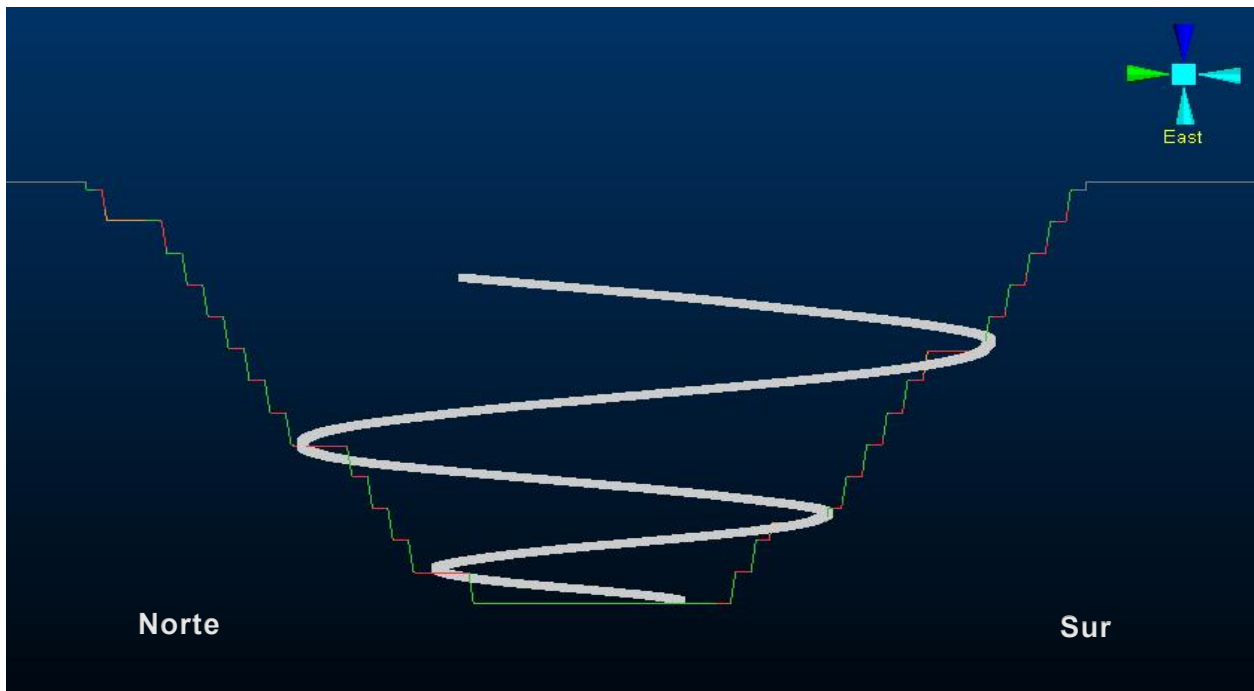


Figura 52: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte norte-sur.

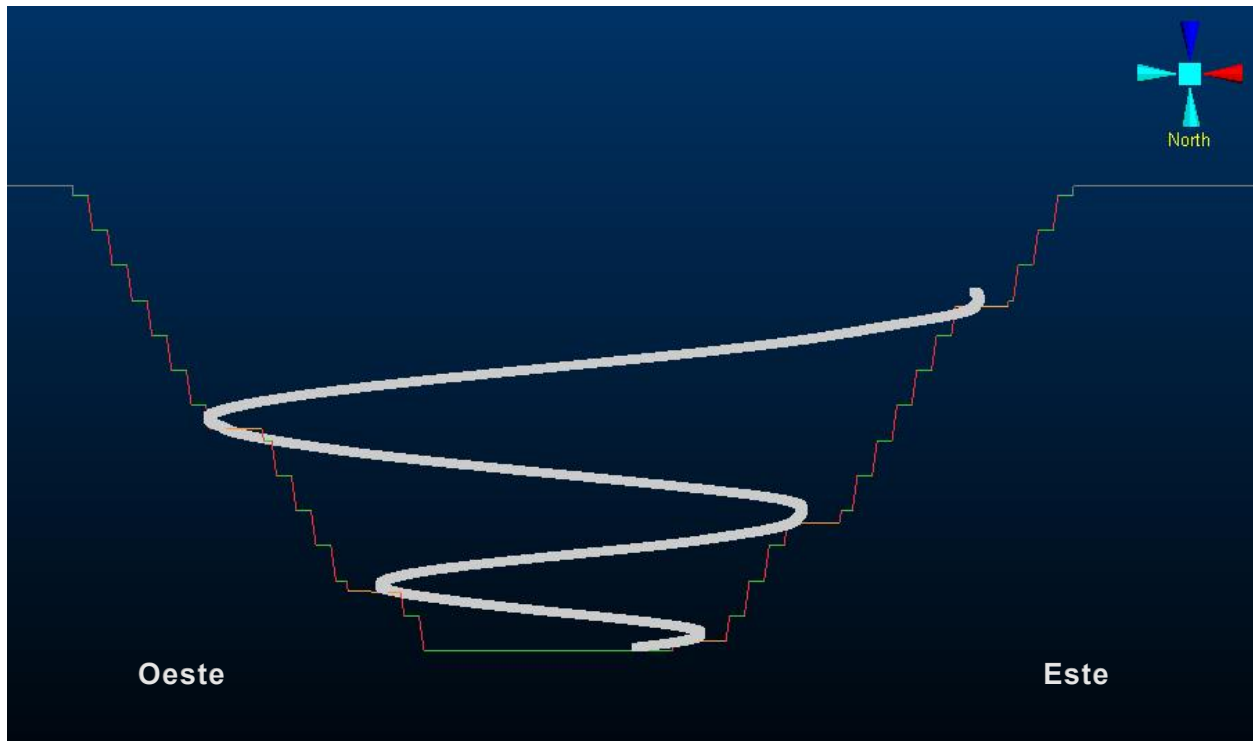


Figura 53: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte oeste-este.

Como se puede ver y al igual que en los casos anteriores el suavizado no reproduce de manera íntegra la geometría definida por la rampa a soporte de bloques. Esto se debe a la complejidad de adaptar trazados con radios pequeños y cambios bruscos. Adicionalmente, la Tabla 43 presenta el comportamiento del ángulo global resultante para cada pared.

Tabla 43: Ángulo caras diseño Best semiautomático.

| Cara     | Angulo (°) |
|----------|------------|
| Norte    | 50.38      |
| Sur      | 53.18      |
| Este     | 47.90      |
| Oeste    | 51.73      |
| Noreste  | 49.45      |
| Suroeste | 53.45      |
| Noroeste | 53.57      |
| Sureste  | 49.67      |

Por último, en la Tabla 44 se presentan los resultados de la cubicación del diseño Best semiautomático suavizado.

*Tabla 44: Cubicación diseño Best semiautomático.*

| Resultado             | Diseño semiautomático | Unidad |
|-----------------------|-----------------------|--------|
| Tonelaje total        | 220.612               | Mt     |
| Tonelaje mineral      | 95.676                | Mt     |
| Tonelaje estéril      | 124.936               | Mt     |
| Razón estéril/mineral | 1.30                  | -      |
| Beneficio total       | 946.227               | MUSD   |

### 5.2.2 NorthPos

A continuación, en la Tabla 45 se presentan los parámetros geométricos considerados en el pit suavizado para este caso NorthPos. Estos incluyen el ancho de rampa, el ángulo de cara de banco, el ancho de berma, la altura de banco y la pendiente de la rampa, los cuales definen las condiciones geométricas y operacionales del diseño final. Para este caso ángulo cara banco es de  $82^\circ$  y una pendiente constante de  $11^\circ$ .

Tabla 45: Parámetros geométricos NorthPos.

| Parámetros         | Valor | Unidad |
|--------------------|-------|--------|
| Ancho de berma     | 8.5   | m      |
| Altura banco       | 20    | m      |
| Ancho de rampa     | 30    | m      |
| Ángulo cara-banco  | 82    | °      |
| Ángulo inter-rampa | 60.5  | °      |
| Pendiente          | 11    | %      |

En la Figura 54 se muestra una vista planta del pit suavizado y la línea blanca representa el recorrido ideal realizado por el diseño semiautomático, por otro lado, la Figura 55 muestra lo mismo, pero desde una vista este.

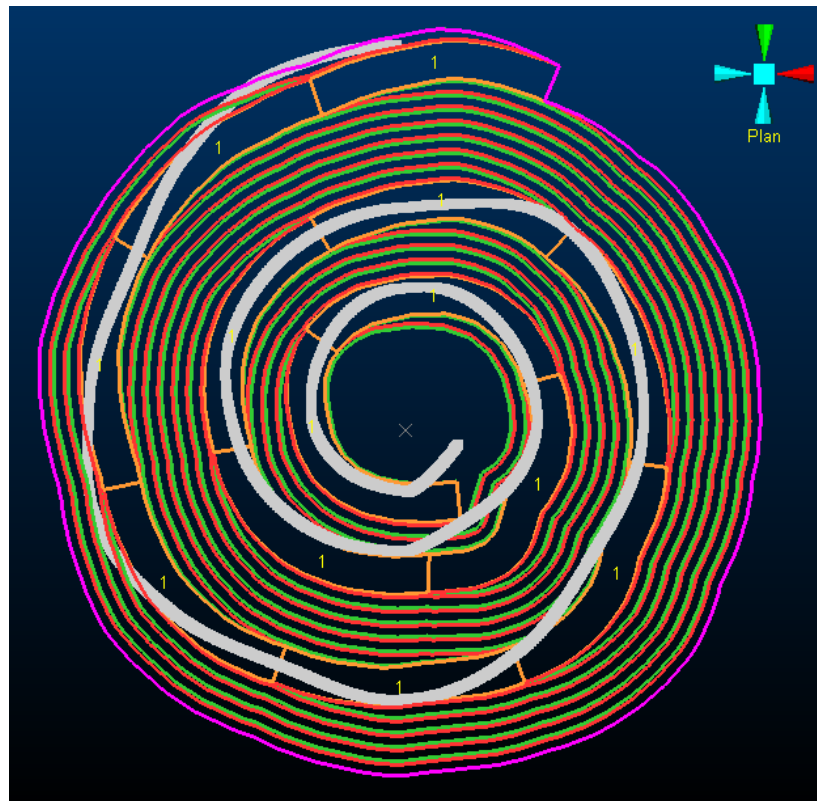


Figura 54: Vista planta ajuste pit suavizado y línea de puntos

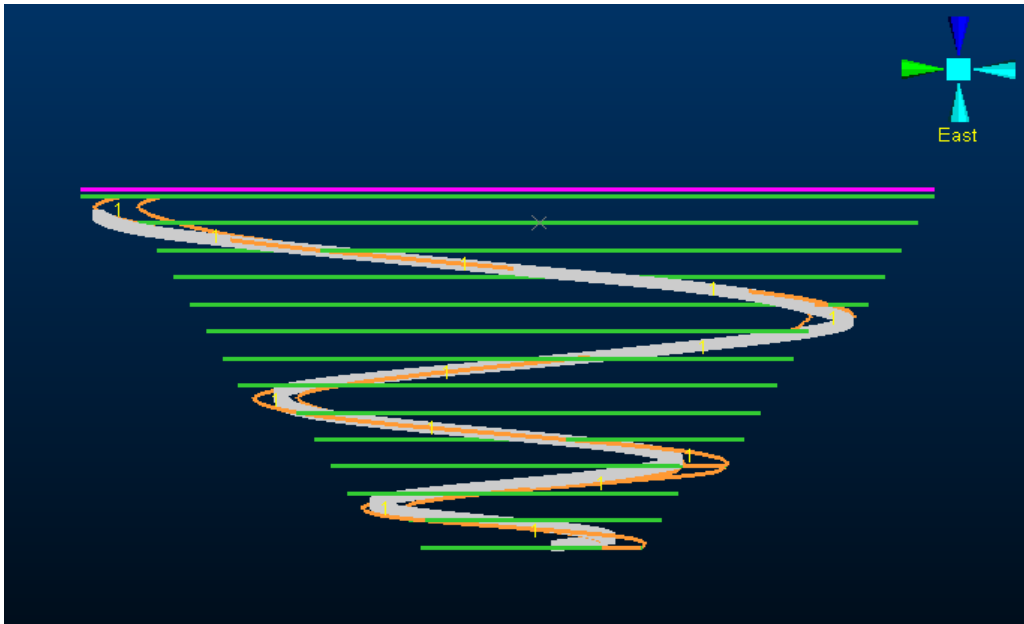


Figura 55: Vista este ajuste pit suavizado y línea de puntos.

La Figura 56 muestra una vista isométrica del pit suavizado por otro lado, las Figuras 57 y 58 muestran el ajuste que existe entre el pit suavizado y el pit final a soporte de bloques en cortes Norte-Sur y Oeste-Este respectivamente.

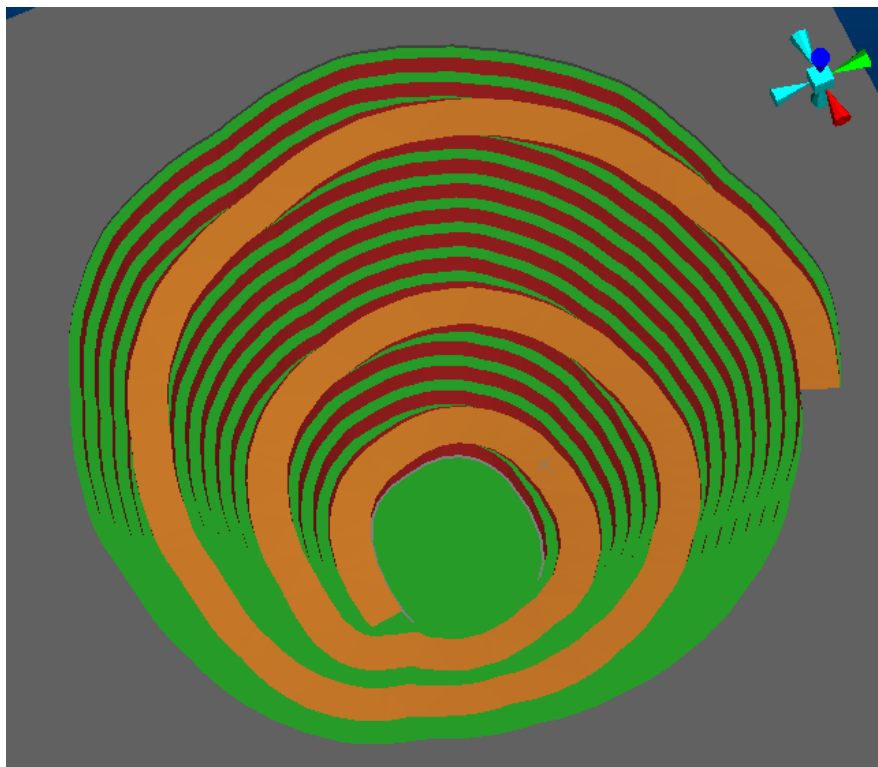


Figura 56: Diseño semiautomático de rampa suavizado, vista isométrica.

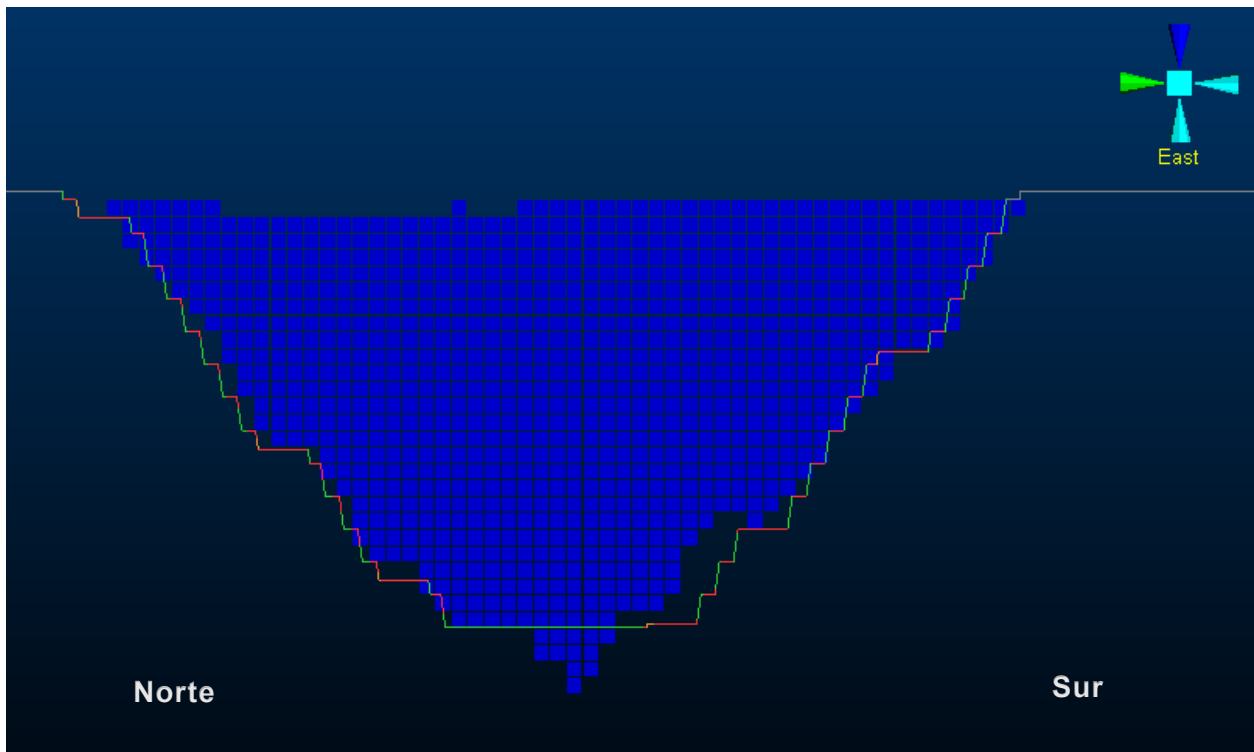


Figura 57: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte norte-sur.

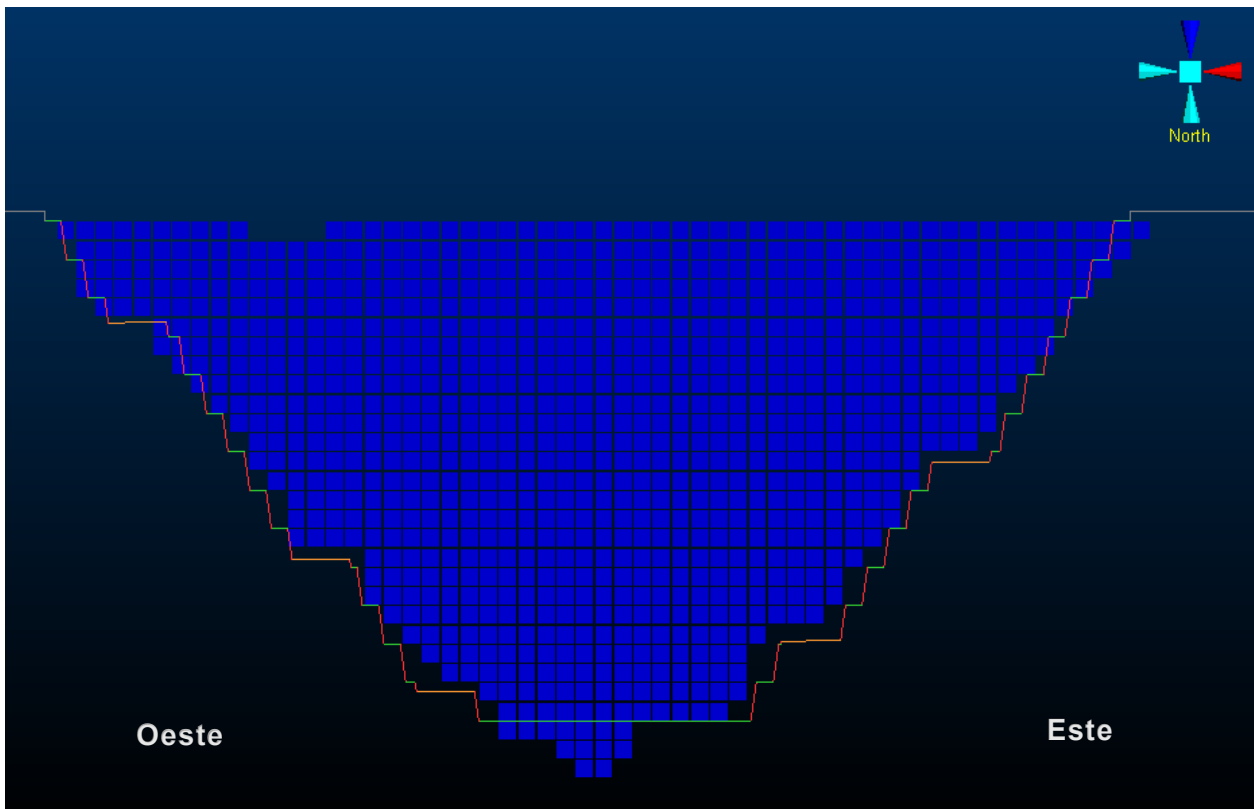


Figura 58: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte oeste-este.

Para una mejor visualización, se presenta la Figura 59, que muestra el corte Norte-Sur del diseño suavizado y su ajuste con la rampa línea de puntos, por otro lado, la Figura 60 presenta el corte Oeste-Este del mismo diseño bajo la misma configuración.

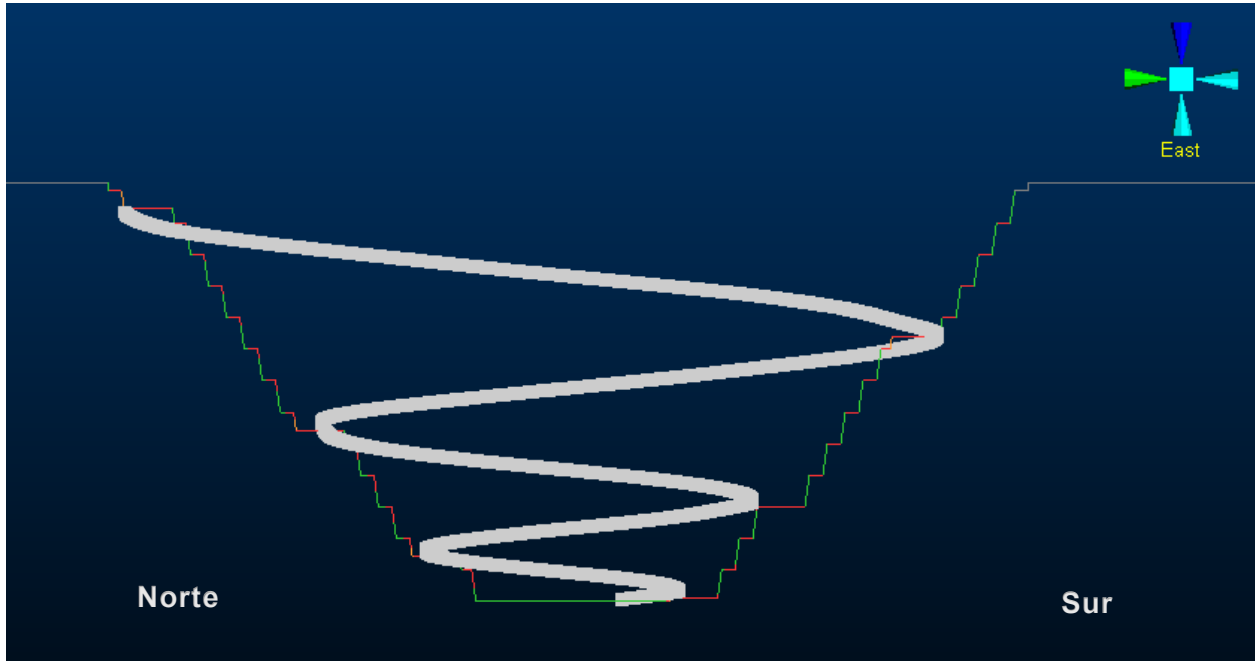


Figura 59: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte norte-sur.

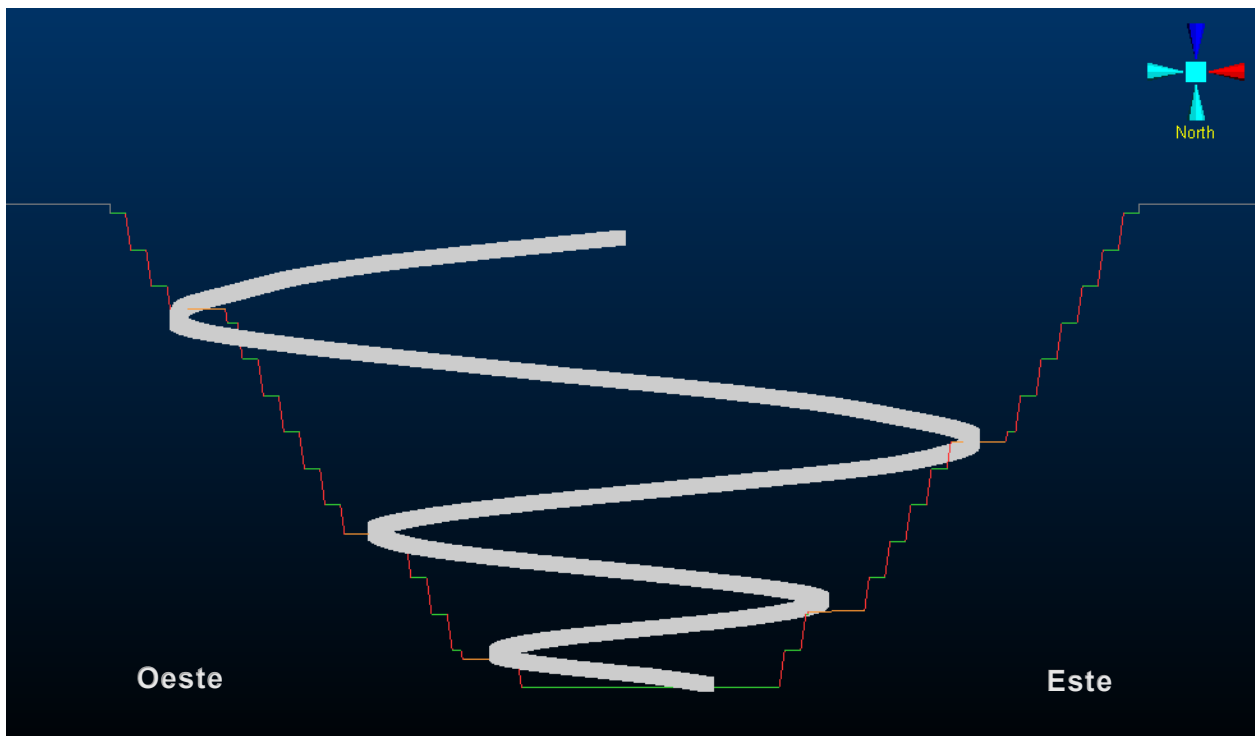


Figura 60: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte norte-sur.

Como se puede ver y al igual que en los casos anteriores el suavizado no reproduce de manera íntegra la geometría definida por la rampa a soporte de bloques. Esto se debe a la complejidad de adaptar trazados con radios pequeños y cambios bruscos. Adicionalmente, la Tabla 46 presenta el comportamiento del ángulo global resultante para cada pared.

*Tabla 46: Ángulo caras diseño NorthPos semiautomático.*

| Cara     | Angulo (°) |
|----------|------------|
| Norte    | 48.68      |
| Sur      | 48.88      |
| Este     | 52.42      |
| Oeste    | 48.88      |
| Noreste  | 52.01      |
| Suroeste | 46.04      |
| Noroeste | 49.47      |
| Sureste  | 50.69      |

Por último, en la Tabla 47 se presentan los resultados de la cubicación del diseño NorthPos semiautomático suavizado.

*Tabla 47: Cubicación diseño NorthPos semiautomático.*

| Resultado             | Diseño semiautomático | Unidad |
|-----------------------|-----------------------|--------|
| Tonelaje total        | 221.510               | Mt     |
| Tonelaje mineral      | 95.596                | Mt     |
| Tonelaje estéril      | 125.914               | Mt     |
| Razón estéril/mineral | 1.31                  | -      |
| Beneficio total       | 951                   | MUSD   |

### 5.2.3 EastNeg

A continuación, en la Tabla 48 se presentan los parámetros geométricos considerados en el pit suavizado para este caso EastNeg. Estos incluyen el ancho de rampa, el ángulo de cara de banco, el ancho de berma, la altura de banco y la pendiente de la rampa, los cuales definen las condiciones geométricas y operacionales del diseño final. Para este caso ángulo cara banco es de  $82^\circ$  y una pendiente constante de  $11.5^\circ$ .

Tabla 48: Parámetros geométricos EastNeg.

| Parámetros         | Valor | Unidad |
|--------------------|-------|--------|
| Ancho de berma     | 8.5   | m      |
| Altura banco       | 20    | m      |
| Ancho de rampa     | 30    | m      |
| Ángulo cara-banco  | 82    | °      |
| Ángulo inter-rampa | 60.5  | °      |
| Pendiente          | 11.5  | %      |

En la Figura 61 se muestra una vista planta del pit suavizado y la línea blanca representa el recorrido ideal realizado por el diseño semiautomático, por otro lado, la Figura 62 muestra lo mismo, pero desde una vista este.

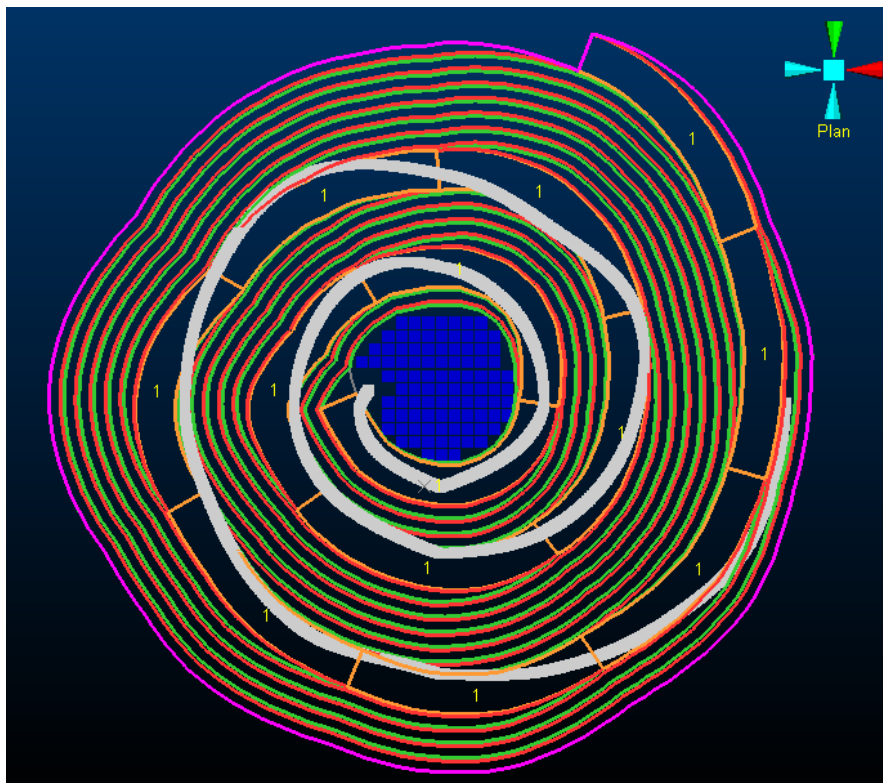


Figura 61: Vista planta ajuste pit suavizado y línea de puntos.

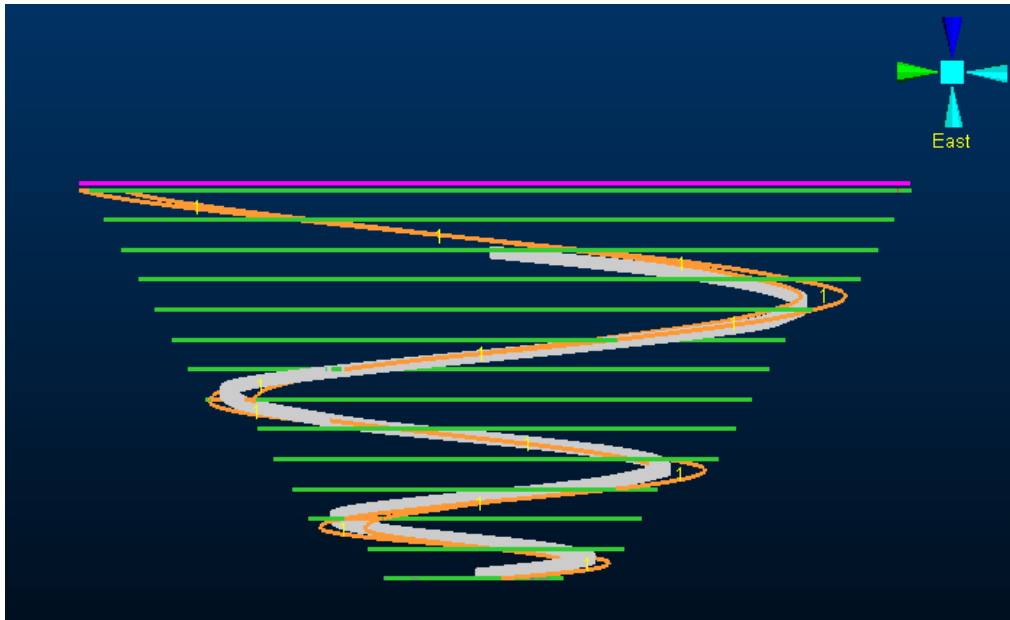


Figura 62: Vista este ajuste pit suavizado y línea de puntos.

La Figura 63 muestra una vista isométrica del pit suavizado por otro lado, las Figuras 64 y 65 muestran el ajuste que existe entre el pit suavizado y el pit final a soporte de bloques en cortes Norte-Sur y Oeste-Este respectivamente.

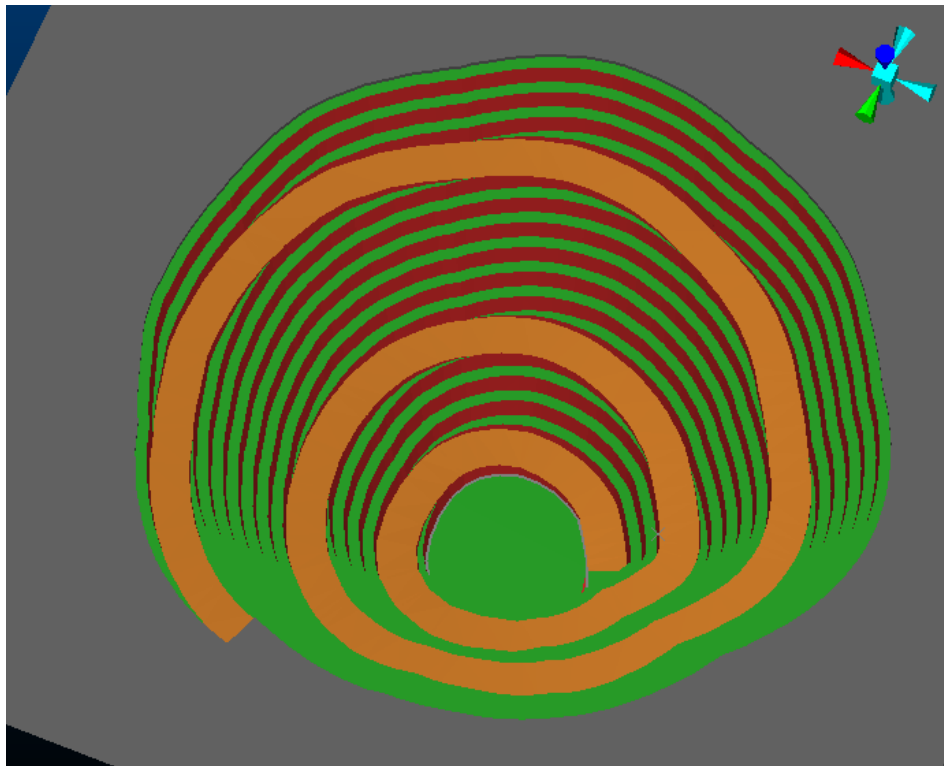


Figura 63: Diseño semiautomático de rampa suavizado, vista isométrica.

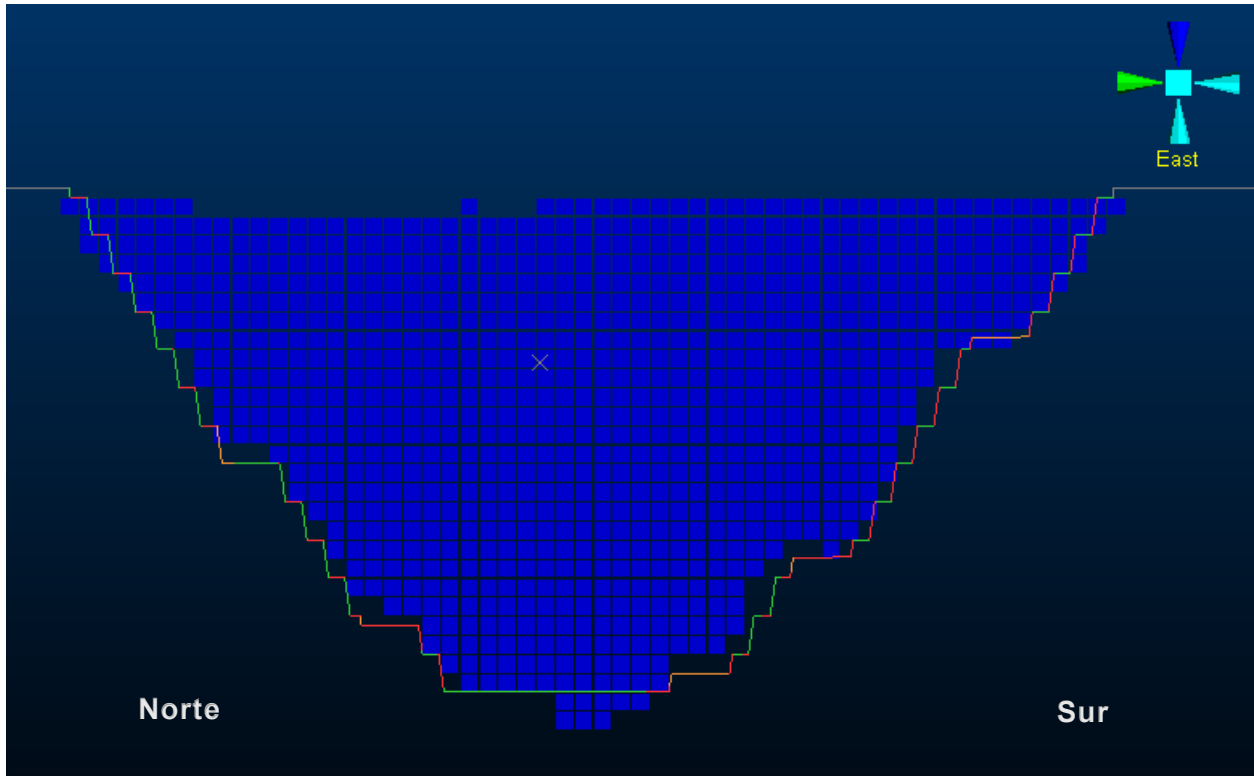


Figura 64: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte norte-sur.

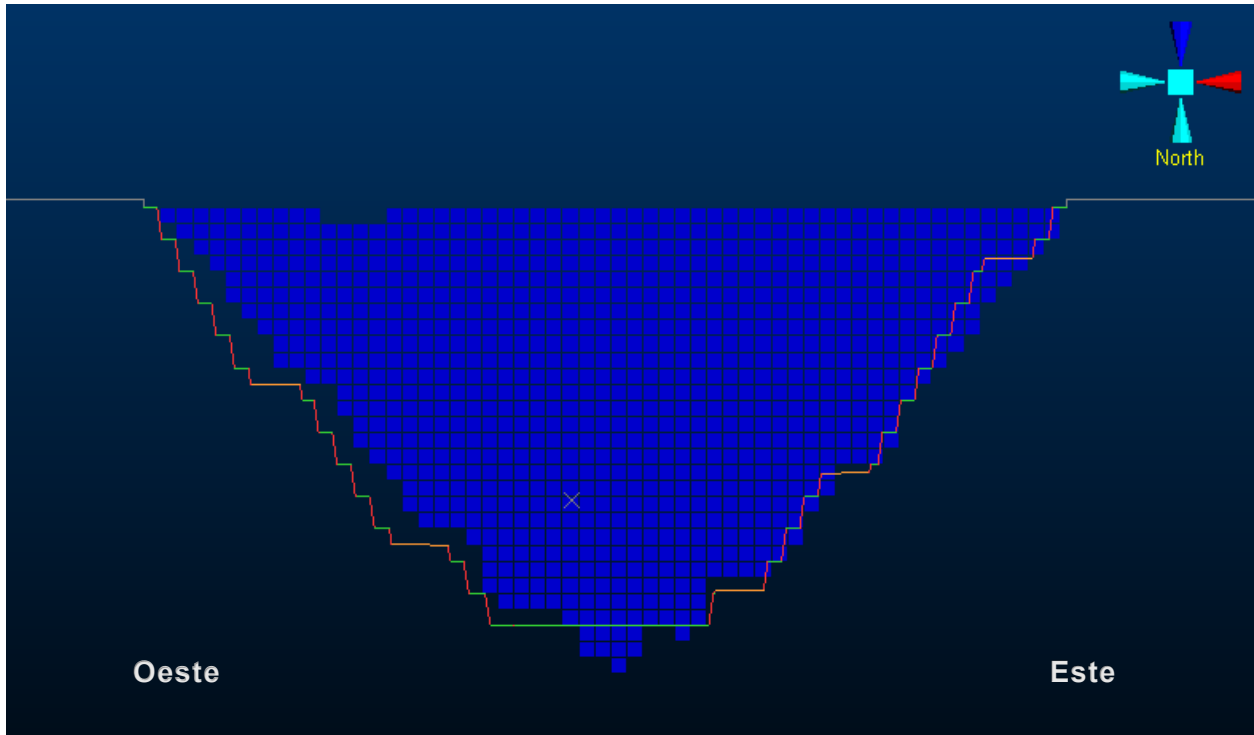


Figura 65: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte oeste-este.

Para una mejor visualización, se presenta la Figura 66, que muestra el corte Norte-Sur del diseño suavizado y su ajuste con la rampa de línea de puntos, por otros lado, la Figura 67 presenta el corte Oeste-Este del mismo diseño bajo la misma configuración.

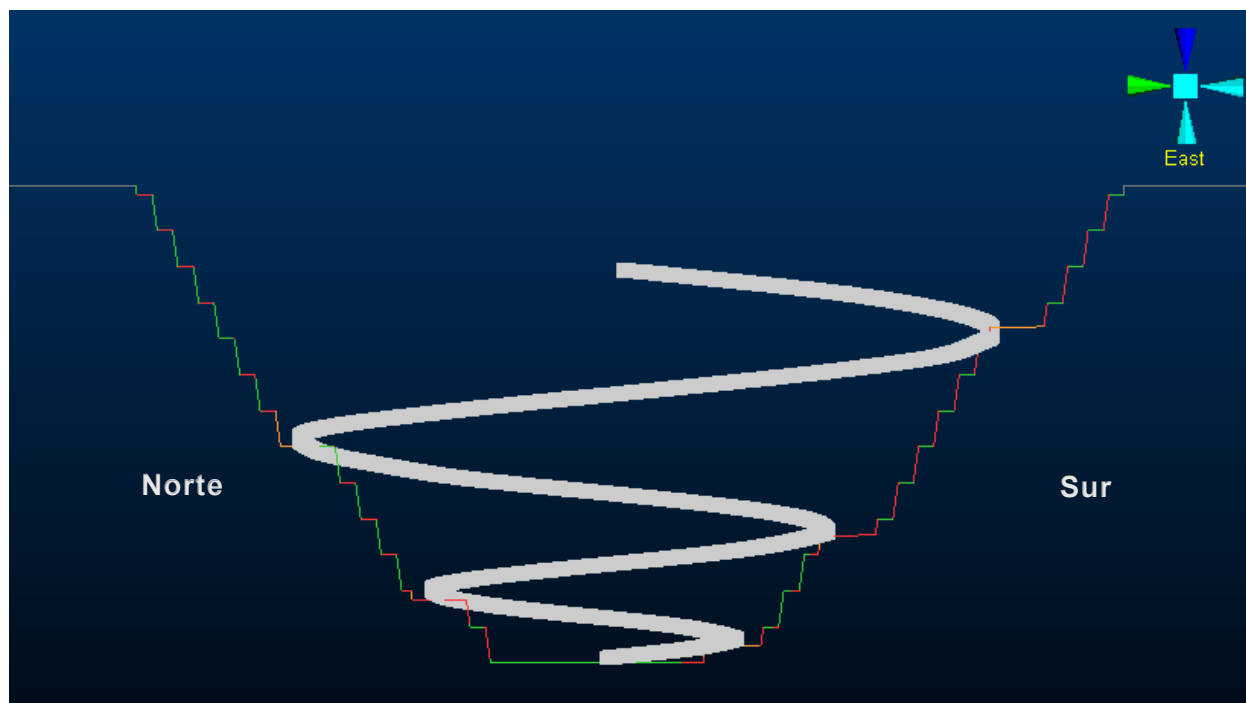


Figura 66: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte norte-sur.

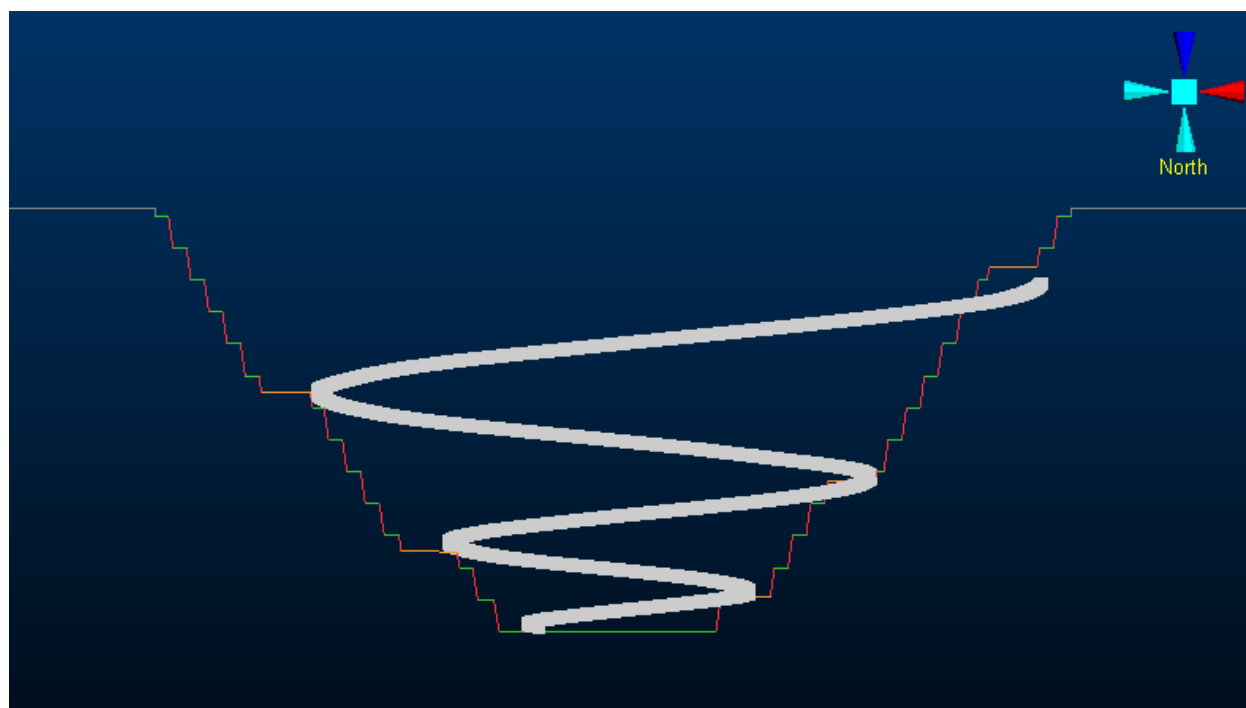


Figura 67: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte oeste-este.

Como se puede ver y al igual que en los casos anteriores el suavizado no reproduce de manera íntegra la geometría definida por la rampa a soporte de bloques. Esto se debe a la complejidad de adaptar trazados con radios pequeños y cambios bruscos. Adicionalmente, la Tabla 49 presenta el comportamiento del ángulo global resultante para cada pared.

*Tabla 49: Ángulo caras diseño EastNeg semiautomático.*

| Cara     | Angulo (°) |
|----------|------------|
| Norte    | 53.29      |
| Sur      | 47.70      |
| Este     | 49.68      |
| Oeste    | 50.36      |
| Noreste  | 47.72      |
| Suroeste | 47.78      |
| Noroeste | 53.54      |
| Sureste  | 48.85      |

Por último, en la Tabla 50 se presentan los resultados de la cubicación del diseño EastNeg semiautomático suavizado.

*Tabla 50: Cubicación diseño EastNeg semiautomático.*

| Resultado             | Diseño semiautomático | Unidad |
|-----------------------|-----------------------|--------|
| Tonelaje total        | 211.111               | Mt     |
| Tonelaje mineral      | 93.506                | Mt     |
| Tonelaje estéril      | 117.605               | Mt     |
| Razón estéril/mineral | 1.25                  | -      |
| Beneficio total       | 962                   | MUSD   |

### 5.2.4 SouthPos

A continuación, en la Tabla 51 se presentan los parámetros geométricos considerados en el pit suavizado para este caso SouthPos. Estos incluyen el ancho de rampa, el ángulo de cara de banco, el ancho de berma, la altura de banco y la pendiente de la rampa, los cuales definen las condiciones geométricas y operacionales del diseño final. Para este caso ángulo cara banco es de  $80^\circ$  y una pendiente constante de  $11.8^\circ$ .

Tabla 51: Parámetros geométricos SouthPos.

| Parámetros         | Valor | Unidad |
|--------------------|-------|--------|
| Ancho de berma     | 8.5   | m      |
| Altura banco       | 20    | m      |
| Ancho de rampa     | 30    | m      |
| Ángulo cara-banco  | 80    | °      |
| Ángulo inter-rampa | 59    | °      |
| Pendiente          | 11.8  | %      |

En la Figura 68 se muestra una vista planta del pit suavizado y la línea blanca representa el recorrido ideal realizado por el diseño semiautomático, por otro lado, la Figura 69 muestra lo mismo, pero desde una vista este.

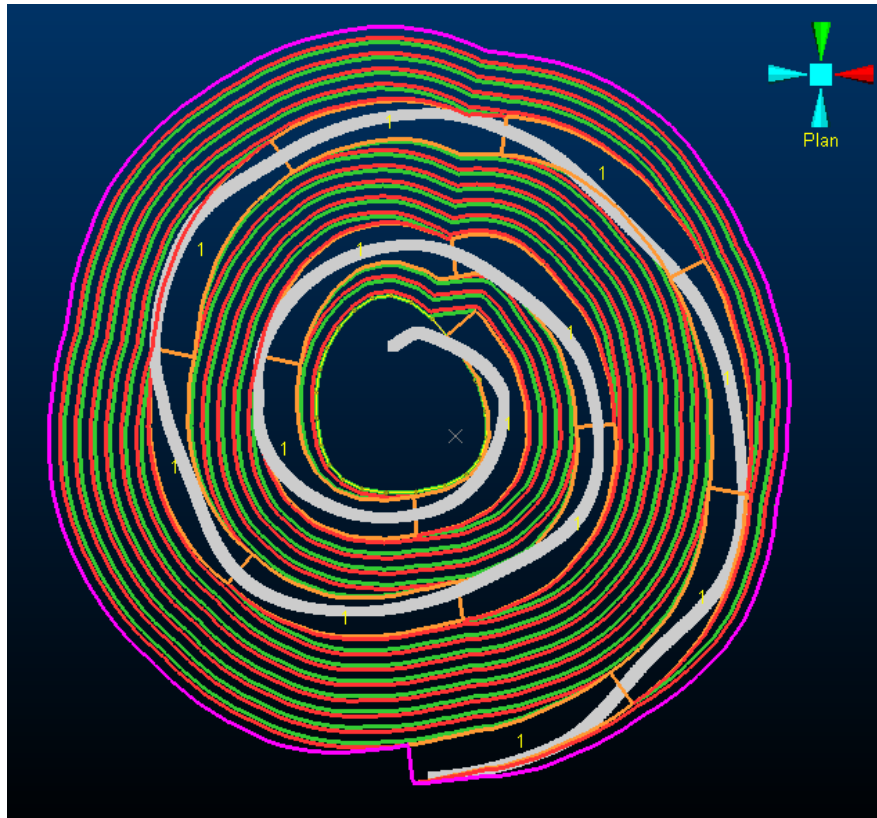


Figura 68: Vista planta ajuste pit suavizado y línea de puntos.

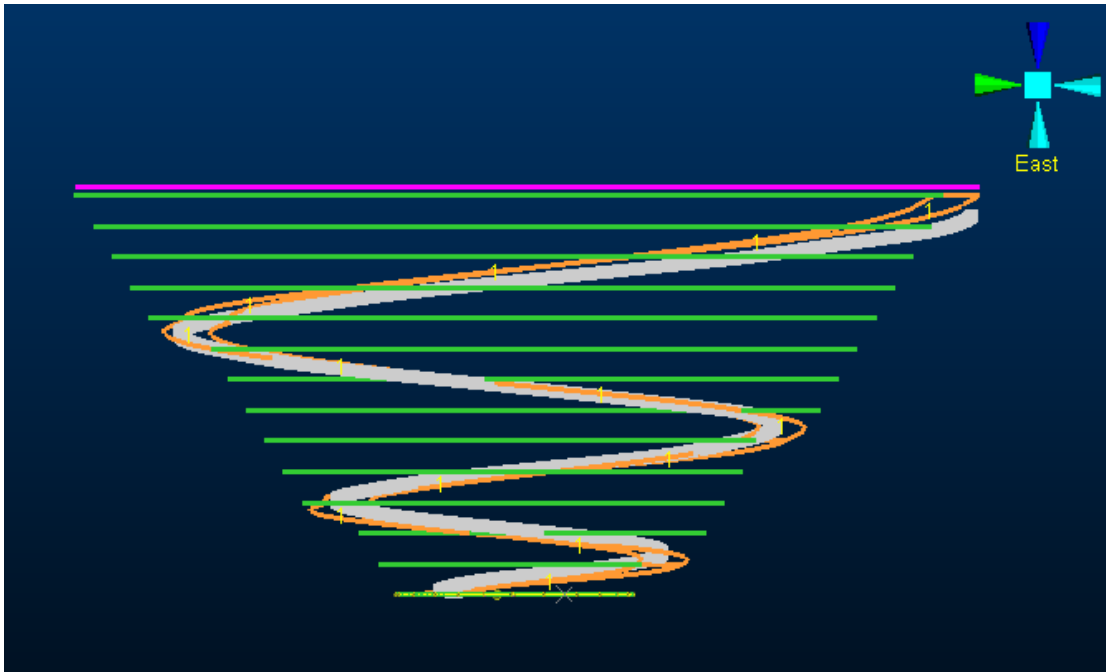


Figura 69: Vista este ajuste pit suavizado y línea de puntos.

La Figura 70 muestra una vista isométrica del pit suavizado por otro lado, las Figuras 71 y 72 muestran el ajuste que existe entre el pit suavizado y el pit final a soporte de bloques en cortes Norte-Sur y Oeste-Este respectivamente.

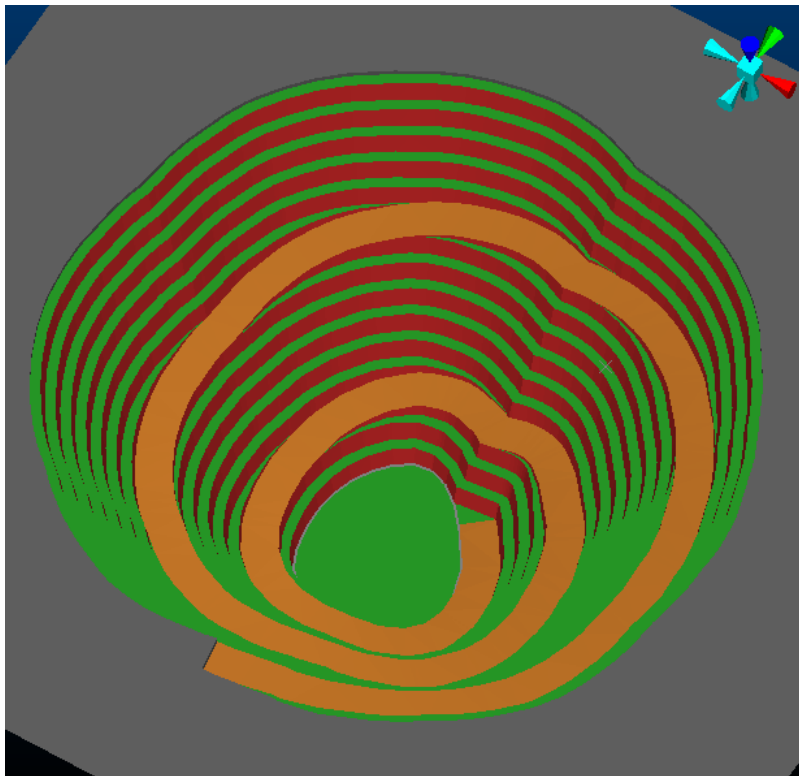


Figura 70: Diseño semiautomático de rampa suavizado, vista isométrica.

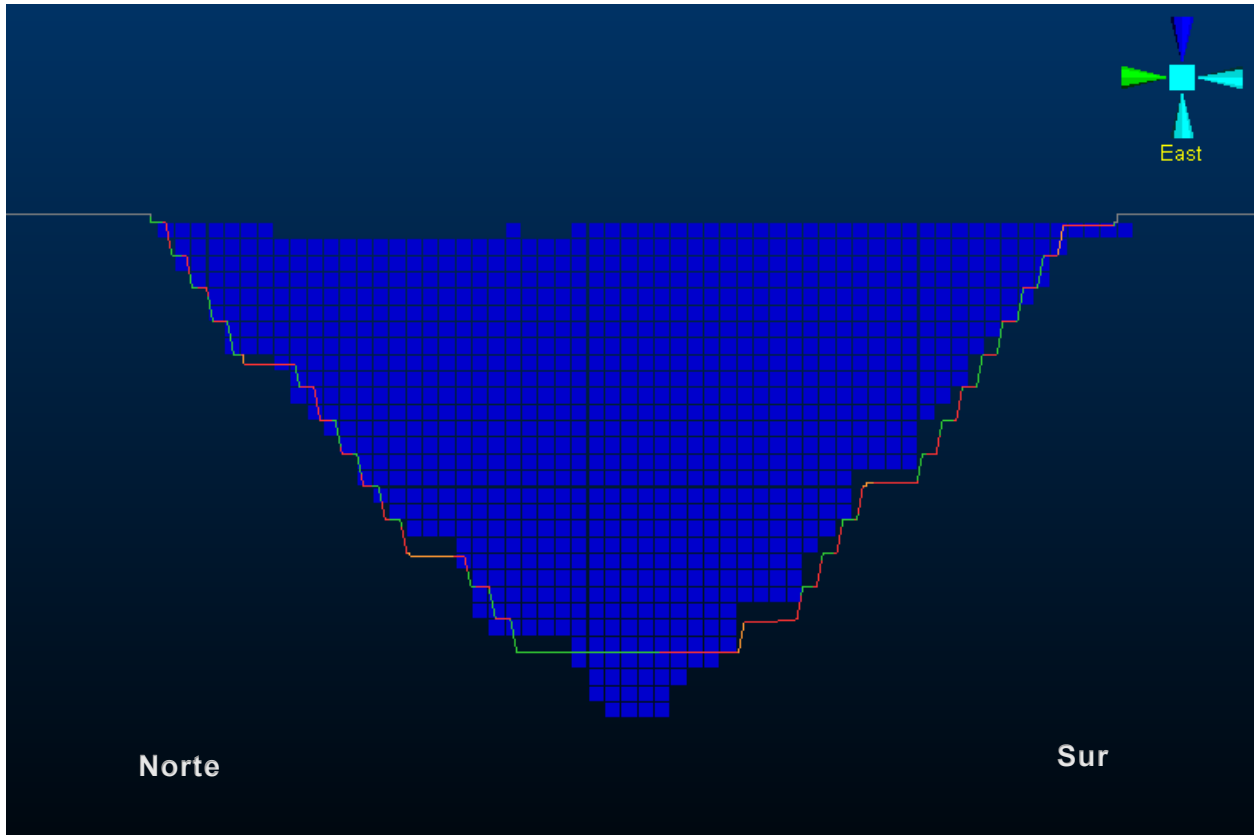


Figura 71: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte norte-sur.

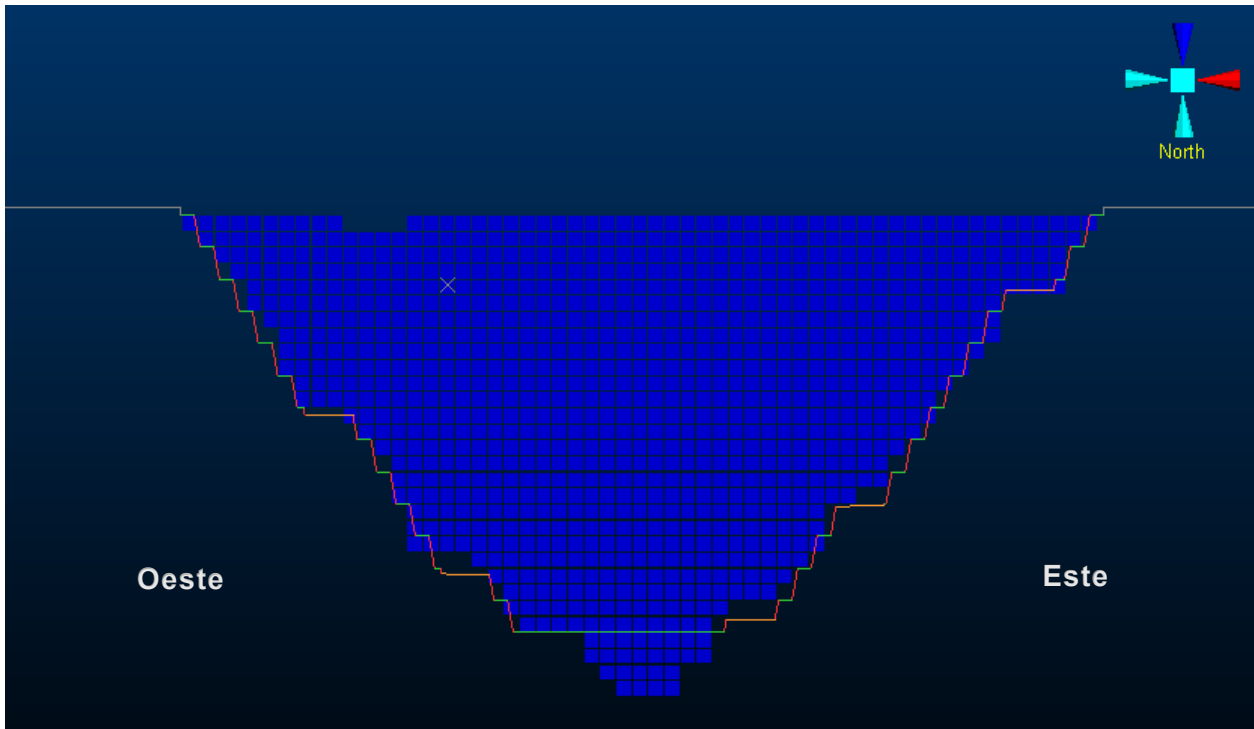


Figura 72: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte oeste-este.

Para una mejor visualización se presenta la Figura 73, que muestra el corte Norte-Sur del diseño suavizado y su ajuste con la rampa de línea de puntos, por otros lado, la Figura 74 presenta el corte Oeste-Este del mismo diseño bajo la misma configuración.

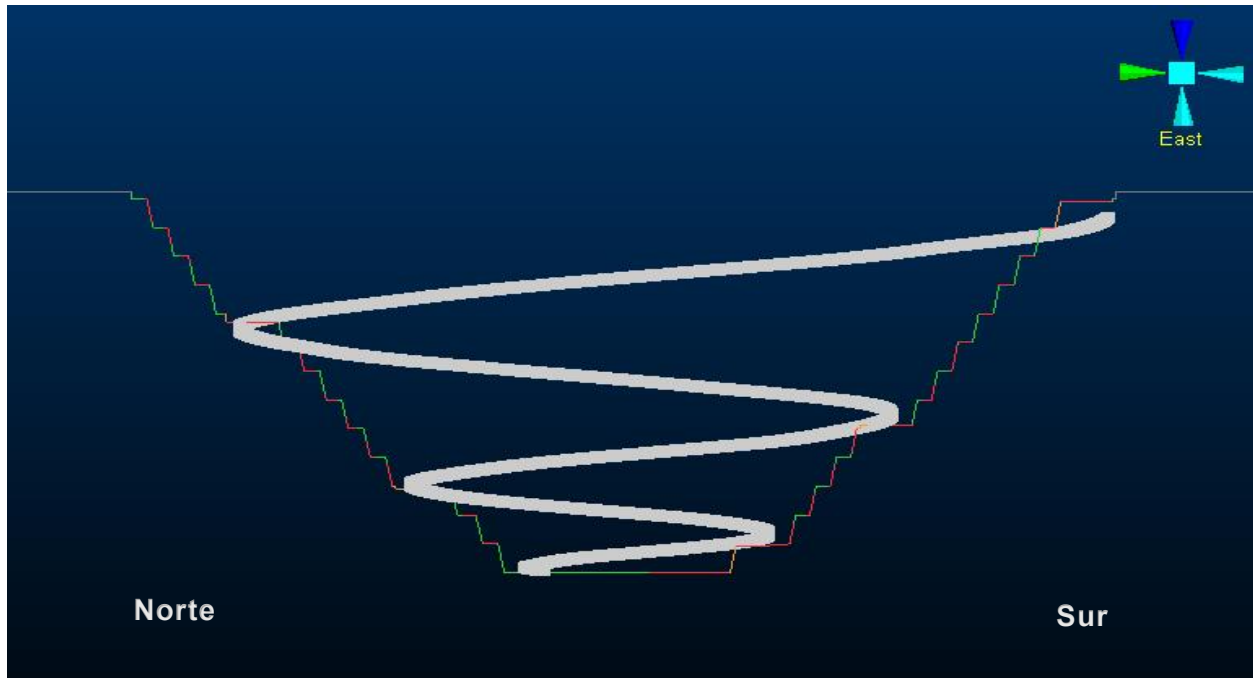


Figura 73: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte norte-sur.

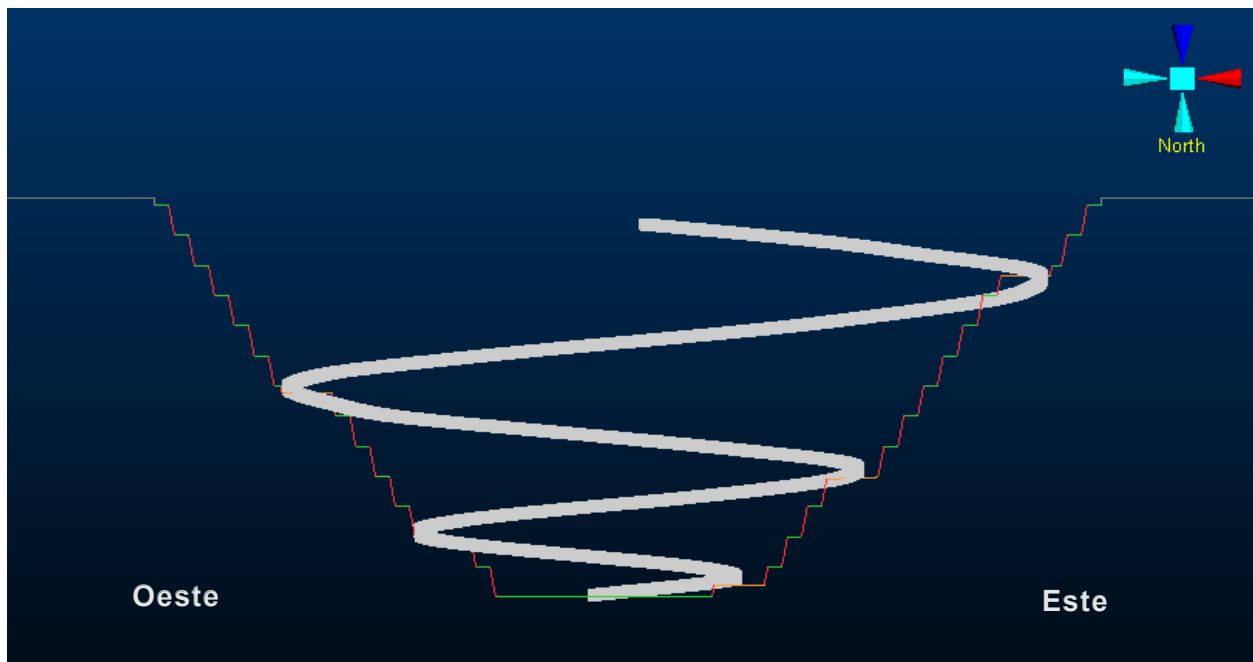


Figura 74: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte oeste-este.

Como se puede ver y al igual que en los casos anteriores el suavizado no reproduce de manera íntegra la geometría definida por la rampa a soporte de bloques. Esto se debe a la complejidad de adaptar trazados con radios pequeños y cambios bruscos. Adicionalmente, la Tabla 52 presenta el comportamiento del ángulo global resultante para cada pared.

*Tabla 52: Ángulo caras diseño SouthPos semiautomático.*

| Cara     | Angulo (°) |
|----------|------------|
| Norte    | 49.95      |
| Sur      | 48.42      |
| Este     | 47.87      |
| Oeste    | 51.04      |
| Noreste  | 47.71      |
| Suroeste | 51.31      |
| Noroeste | 51.36      |
| Sureste  | 46.29      |

Por último, en la Tabla 53 se presentan los resultados de la cubicación del diseño SouthPos semiautomático suavizado.

*Tabla 53: Cubicación diseño SouthPos semiautomático.*

| Resultado             | Diseño semiautomático | Unidad |
|-----------------------|-----------------------|--------|
| Tonelaje total        | 225.986               | Mt     |
| Tonelaje mineral      | 96.231                | Mt     |
| Tonelaje estéril      | 129.755               | Mt     |
| Razón estéril/mineral | 1.35                  | -      |
| Beneficio total       | 935                   | MUSD   |

### 5.2.5 WestNeg

A continuación, en la Tabla 54 se presentan los parámetros geométricos considerados en el pit suavizado, para este caso WestNeg. Estos incluyen el ancho de rampa, el ángulo de cara de banco, el ancho de berma, la altura de banco y la pendiente de la rampa, los cuales definen las condiciones geométricas y operacionales del diseño final. Para este caso ángulo cara banco es de  $82^\circ$  y una pendiente constante de  $10.5^\circ$ . Además, se aprecia como la rampa de línea de puntos no llega hasta la superficie.

Tabla 54: Parámetros geométricos WestNeg.

| Parámetros         | Valor | Unidad   |
|--------------------|-------|----------|
| Ancho de berma     | 8.5   | m        |
| Altura banco       | 20    | m        |
| Ancho de rampa     | 30    | m        |
| Ángulo cara-banco  | 82    | $^\circ$ |
| Ángulo inter-rampa | 60.5  | $^\circ$ |
| Pendiente          | 10.5  | %        |

En la Figura 75 se muestra una vista planta del pit suavizado y la línea blanca representa el recorrido ideal realizado por el diseño semiautomático, por otro lado, la Figura 76 muestra lo mismo, pero desde una vista este.

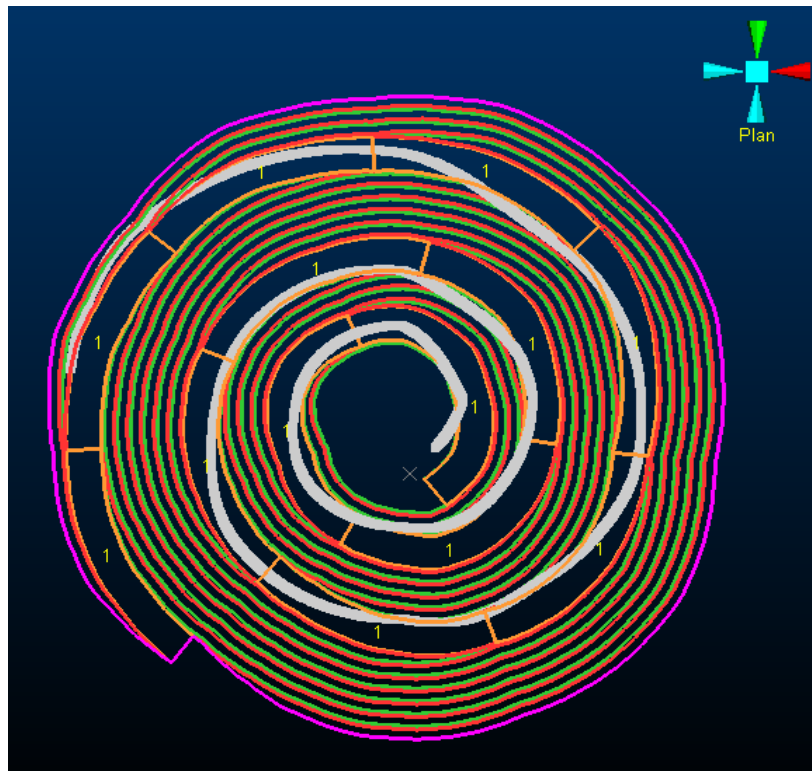


Figura 75: Vista planta ajuste pit suavizado y línea de puntos.

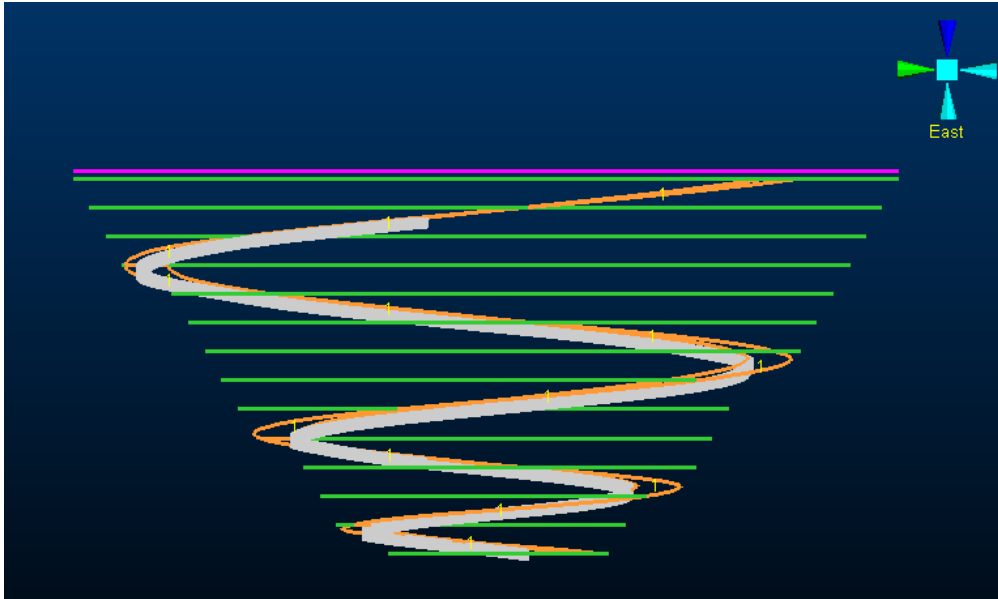


Figura 76: Vista planta ajuste pit suavizado y línea de puntos.

La Figura 77 muestra una vista isométrica del pit suavizado por otro lado, las Figuras 78 y 79 muestran el ajuste que existe entre el pit suavizado y el pit final a soporte de bloques en cortes Norte-Sur y Oeste-Este respectivamente

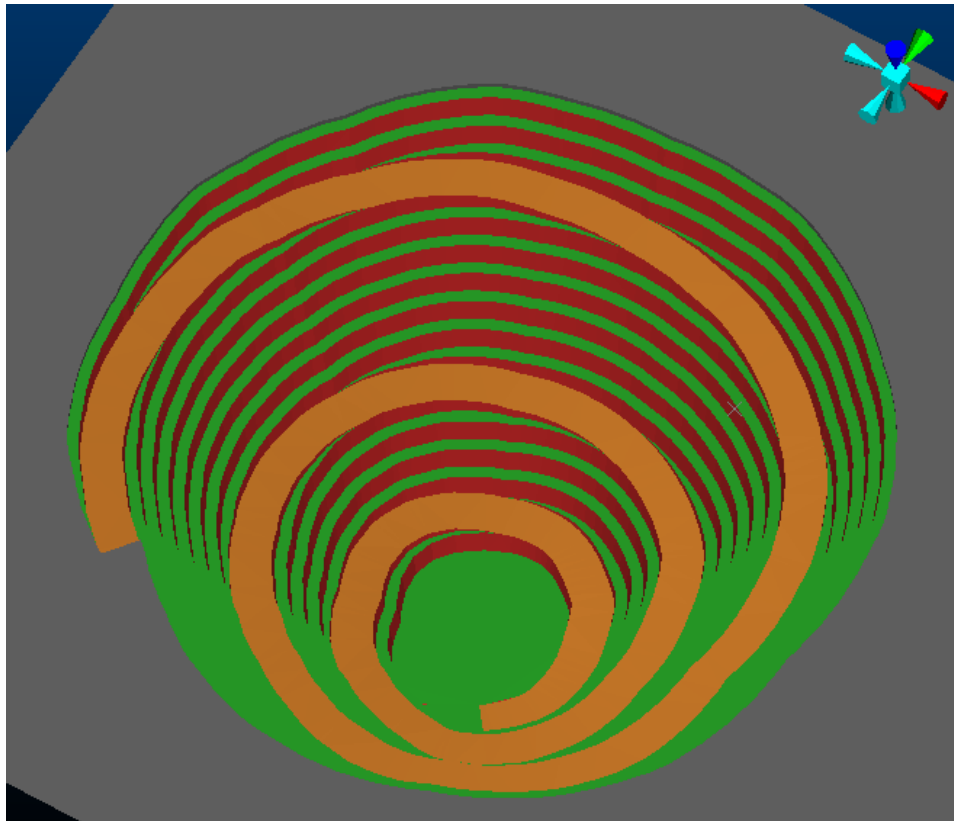


Figura 77: Diseño semiautomático de rampa suavizado, vista isométrica.

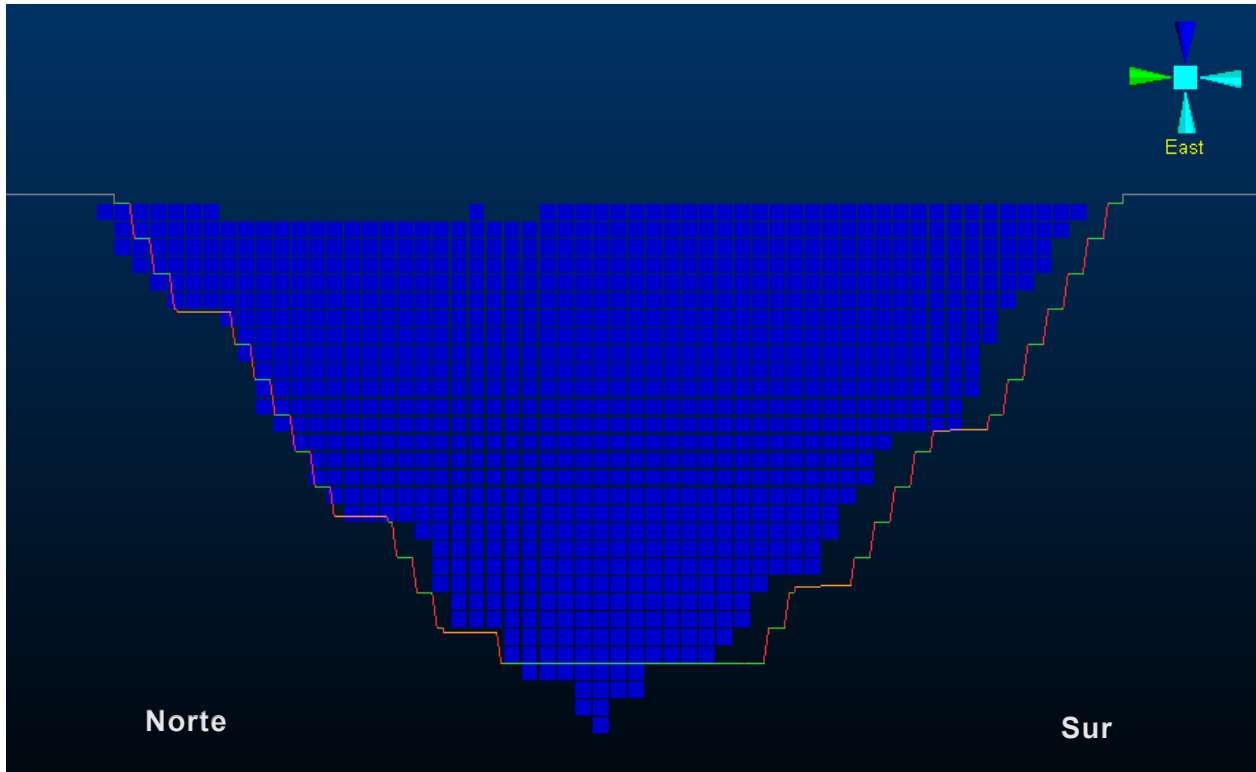


Figura 78: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte oeste-este.

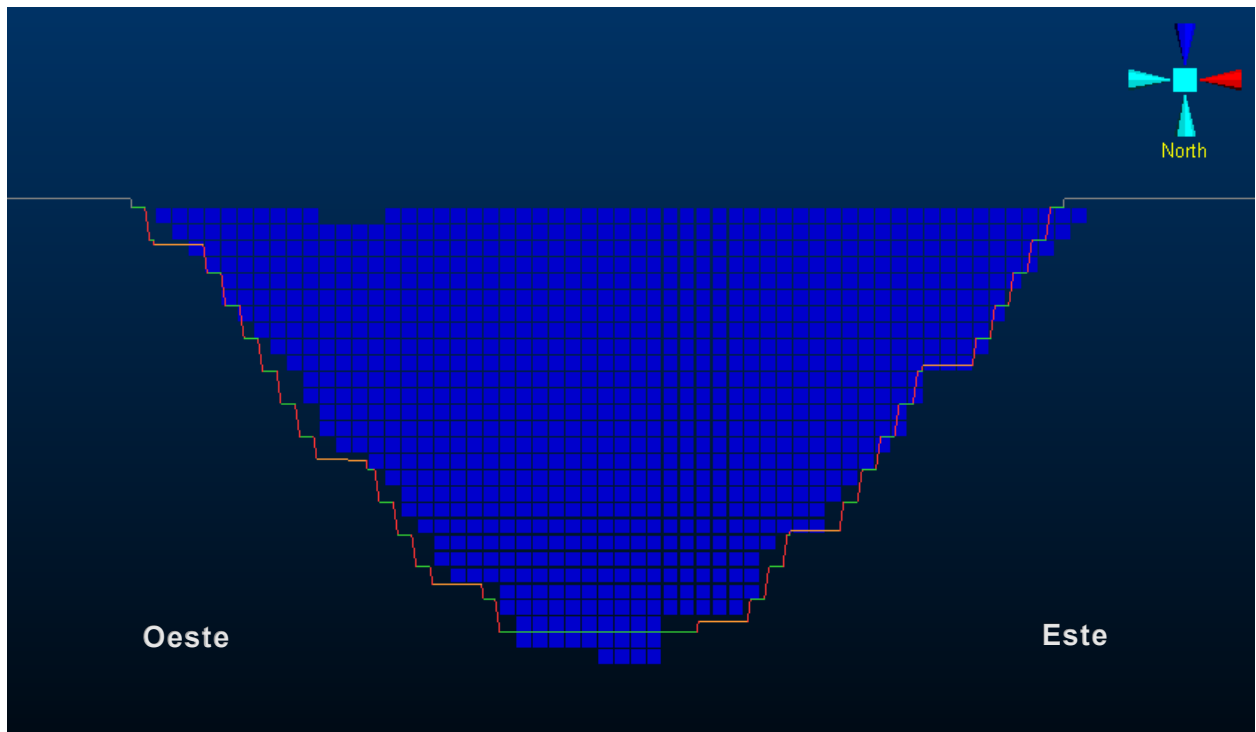


Figura 79: Diseño semiautomático de rampas suavizado y pit final, corte oeste-este.

Para una mejor visualización, se presenta la Figura 80, que muestra el corte Norte-Sur del diseño suavizado y su ajuste con la rampa de línea de puntos, por otro lado, la Figura 81 presenta el corte Oeste-Este del mismo diseño bajo la misma configuración.

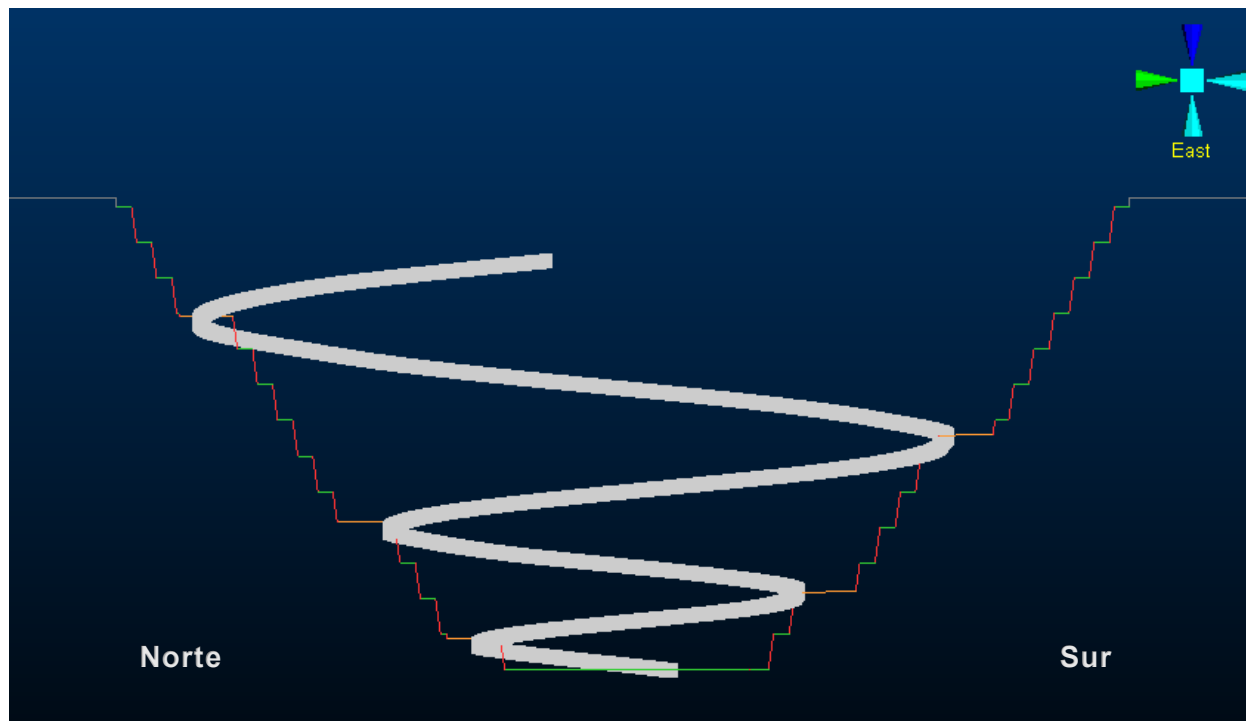


Figura 80: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte norte-sur.

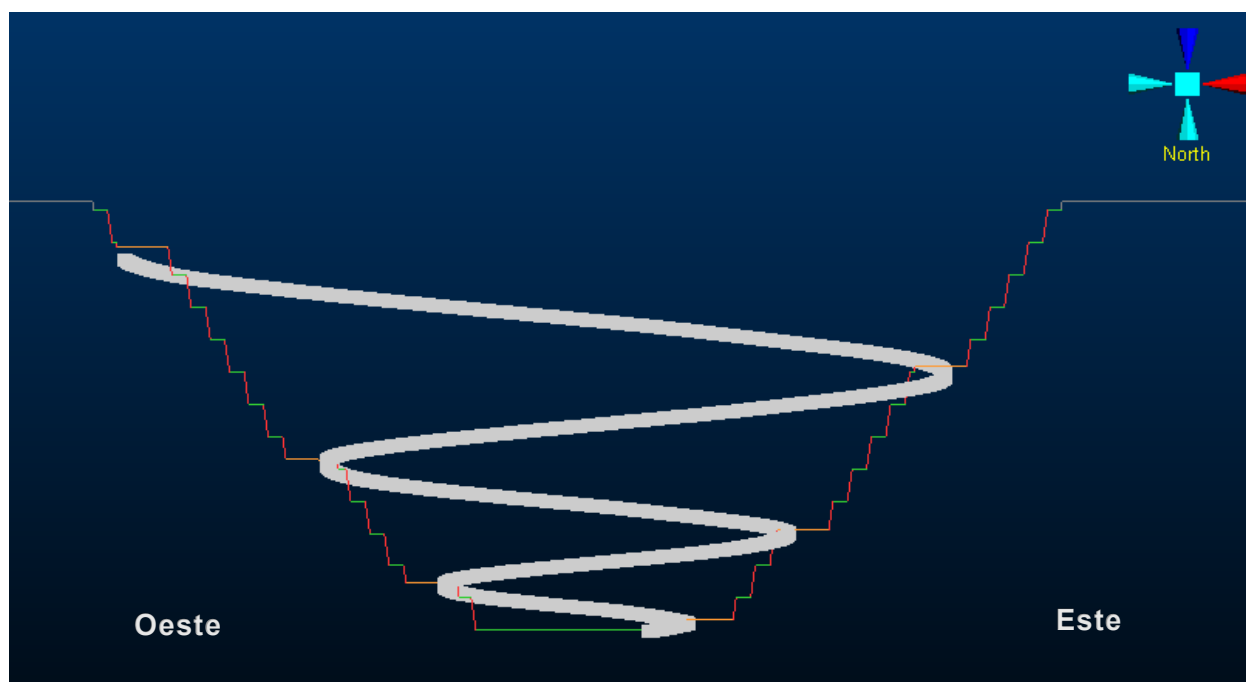


Figura 81: Diseño semiautomático suavizado y la rampa en soporte de bloques, corte oeste-este.

Como se puede ver y al igual que en los casos anteriores el suavizado no reproduce de manera íntegra la geometría definida por la rampa a soporte de bloques. Esto se debe a la complejidad de adaptar trazados con radios pequeños y cambios bruscos. Adicionalmente, la Tabla 55 presenta el comportamiento del ángulo global resultante para cada pared.

*Tabla 55: Ángulo caras diseño WestNeg semiautomático.*

| Cara     | Angulo (°) |
|----------|------------|
| Norte    | 49.77      |
| Sur      | 52.46      |
| Este     | 48.60      |
| Oeste    | 48.56      |
| Noreste  | 48.36      |
| Suroeste | 49.49      |
| Noroeste | 48.95      |
| Sureste  | 47.17      |

Por último, en la Tabla 56 se presentan los resultados de la cubicación del diseño WestNeg semiautomático suavizado.

*Tabla 56: Cubicación diseño WestNeg semiautomático.*

| Resultado             | Diseño semiautomático | Unidad |
|-----------------------|-----------------------|--------|
| Tonelaje total        | 220.994               | Mt     |
| Tonelaje mineral      | 95.316                | Mt     |
| Tonelaje estéril      | 125.678               | Mt     |
| Razón estéril/mineral | 1.35                  | -      |
| Beneficio total       | 938                   | MUSD   |

### 5.3. Análisis resultados

A partir de las metodologías aplicadas en el Caso de Estudio 2, es posible realizar una comparación de carácter técnico y económico entre los distintos diseños obtenidos. Para ello, se adopta como referencia el pit final generado mediante UPIT, el cual es contrastado con el pit a soporte de bloques correspondiente al caso específico y con su respectiva versión suavizada, obtenida mediante el software Datamine OP.

#### 5.3.1 Best

A continuación, en la Tabla 57 se muestra la cubicación y beneficio correspondiente al caso Best, utilizada como base para el análisis de estos resultados, por otro lado, la Tabla 58 muestra los ángulos obtenidos.

Tabla 57: Comparación de tonelaje y beneficio entre pits finales y diseño semiautomático.

| Resultado             | UPIT      | Best    | semiautomático | Unidad |
|-----------------------|-----------|---------|----------------|--------|
| Tonelaje total        | 237.939   | 220.020 | 220.612        | Mt     |
| Diferencia            | 0         | -7.54   | -7.29          | %      |
| Tonelaje mineral      | 105.861   | 96.156  | 95.676         | Mt     |
| Diferencia            | 0         | -9.17   | -9.61          | %      |
| Tonelaje estéril      | 132.078   | 124.046 | 124.936        | Mt     |
| Diferencia            | 0         | -6.09   | -5.41          | %      |
| Razón estéril/mineral | 1.24      | 1.29    | 1.31           | -      |
| Beneficio total       | 1,075.124 | 973.088 | 946.227        | MUSD   |
| Diferencia            | 0         | -9.50   | -11.99         | %      |

Al comparar el UPIT con el diseño Best a soporte de bloques con rampa, se observa una disminución relevante del tonelaje total 7.5 % y del tonelaje mineral 9.2 %, acompañada de una reducción del tonelaje de estéril 6.1 %. Esta pérdida de mineral se refleja directamente en el beneficio total, que disminuye en 9.5 %, alcanzando 973 MUSD, mientras que la razón estéril/mineral aumenta de 1.24 a 1.29.

El diseño semiautomático, obtenido a partir del suavizado del pit a soporte de bloques, mantiene un comportamiento similar en términos de tonelajes, con una reducción del tonelaje total de 7.3 % y del tonelaje mineral de 9.6 % respecto del UPIT. El tonelaje de estéril disminuye en 5.4 %, sin embargo, la razón estéril/mineral aumenta levemente hasta 1.31, evidenciando una geometría menos restrictiva. Desde el punto de vista económico, el beneficio total del caso semiautomático alcanza 946 MUSD, lo que representa una disminución de 12.0 % respecto del UPIT y un desempeño inferior al caso Best.

*Tabla 58: Comparación de ángulos entre pits finales, diseño semiautomático y teóricos.*

| Resultado | UPIT  | Best  | Semiautomático | Teórico |
|-----------|-------|-------|----------------|---------|
| Norte     | 52.39 | 50.51 | 50.38          | 52      |
| Sur       | 50.07 | 49.52 | 53.18          | 52      |
| Este      | 52.09 | 45.84 | 47.90          | 52      |
| Oeste     | 52.28 | 46.07 | 51.73          | 55.1    |
| Noreste   | 51.66 | 46.11 | 49.45          | 52      |
| Suroeste  | 52.52 | 46.14 | 53.45          | 55.1    |
| Noroeste  | 51.70 | 46.27 | 53.57          | 55.1    |
| Sureste   | 49.74 | 45.75 | 49.67          | 52      |

El escenario UPIT presenta ángulos globales elevados, con valores entre 49.7° y 52.5°, los cuales representan una envolvente teórica a nivel de bloques. El diseño Best a soporte de bloques con rampa muestra una disminución sistemática de los ángulos, con valores entre 45.8° y 50.5°, generando diferencias del orden de 2° a 6° respecto de los ángulos teóricos, los cuales ya incorporan la geometría de rampas. El diseño semiautomático permite una recuperación parcial de los ángulos globales, alcanzando valores cercanos o superiores a los teóricos en varias direcciones, y reduciendo la dispersión observada en el pit a soporte de bloques, lo que se traduce en una geometría más homogénea y consistente con los parámetros de diseño definidos.

### 5.3.2 NorthPos

En segundo lugar, se obtiene los datos para el caso NorthPos, la Tabla 59 muestra la comparación entre los tonelajes y beneficio del UPIT, pit final del NorthPos y el pit suavizado, mientras la Tabla 60 muestra los ángulos obtenidos de los mismo tres pit.

*Tabla 59: Comparación de tonelaje y beneficio entre pits finales y diseño semiautomático.*

| Resultado             | UPIT      | NorthPos | Semiautomático | Unidad |
|-----------------------|-----------|----------|----------------|--------|
| Tonelaje total        | 237.939   | 212.581  | 221.510        | Mt     |
| Diferencia            | 0         | -10.66   | -6.91          | %      |
| Tonelaje mineral      | 105.861   | 92.621   | 95.596         | Mt     |
| Diferencia            | 0         | -12.51   | -9.73          | %      |
| Tonelaje estéril      | 132.078   | 119.960  | 125.914        | Mt     |
| Diferencia            | 0         | -9.18    | -4.67          | %      |
| Razón estéril/mineral | 1.24      | 1.29     | 1.31           | -      |
| Beneficio total       | 1,075.124 | 954.420  | 951.245        | MUSD   |
| Diferencia            | 0         | -11.23   | -11.53         | %      |

Al incorporar la rampa en la posición NorthPos, el diseño a soporte de bloques evidencia una gran reducción del tonelaje total de 10.7 % y del tonelaje mineral de 12.5 %, junto con una disminución del tonelaje de estéril de 9.2 %. Esta pérdida de mineral se traduce en una caída relevante del beneficio total, que alcanza 954 MUSD, equivalente a una disminución de 11.2 % respecto del UPIT, mientras que la razón estéril/mineral aumenta de 1.24 a 1.29.

El diseño semiautomático presenta una recuperación parcial en términos de tonelajes, con un tonelaje total de 221.5 Mt y 95.6 Mt de mineral respecto del UPIT. No obstante, la razón estéril/mineral aumenta levemente hasta 1.31, reflejando una geometría menos restrictiva. Desde el punto de vista económico, el beneficio total del caso semiautomático alcanza 951 MUSD, con una disminución de 11.5 % respecto del UPIT, manteniéndose en un nivel similar al caso NorthPos a soporte de bloque

Tabla 60: Comparación de ángulos entre pits finales, diseño semiautomático y teóricos.

| Resultado | UPIT  | NorthPos | Semiautomático | Teórico |
|-----------|-------|----------|----------------|---------|
| Norte     | 52.39 | 46.67    | 48.68          | 52      |
| Sur       | 50.07 | 47.75    | 48.88          | 52      |
| Este      | 52.09 | 47.44    | 52.42          | 55.1    |
| Oeste     | 52.28 | 46.59    | 48.88          | 52      |
| Noreste   | 51.66 | 45.36    | 52.01          | 55.1    |
| Suroeste  | 52.52 | 47.78    | 46.04          | 52      |
| Noroeste  | 51.70 | 47.83    | 49.47          | 52      |
| Sureste   | 49.74 | 47.74    | 50.69          | 55.1    |

El diseño NorthPos a soporte de bloques con rampa muestra una disminución generalizada de los ángulos globales respecto del UPIT. En la mayoría de las direcciones, los ángulos se sitúan entre 45.4° y 47.8°, generándose diferencias del orden de 4° a 6° respecto de los ángulos teóricos de 52° a 55.1°, los cuales ya consideran la geometría de rampas. Este comportamiento es coherente con las restricciones geométricas introducidas por la posición de la rampa en el diseño.

El diseño semiautomático evidencia una recuperación parcial de los ángulos globales. En direcciones como Este 52.42° y Noreste 52.01°, los valores alcanzan o se aproximan a los ángulos teóricos, mientras que, en otras, como Suroeste 46.04°, se mantienen diferencias relevantes. En términos generales, el suavizado semiautomático reduce la dispersión de los ángulos respecto del pit a soporte de bloques, generando una geometría más homogénea, aunque sin reproducir de forma uniforme los ángulos teóricos en todas las direcciones.

### 5.3.3 EastNeg

En tercer lugar, se obtiene los datos para el caso EastNeg, la Tabla 61 muestra la comparación entre los tonelajes y beneficio del UPIT, pit final del NorthPos y el pit suavizado, mientras la Tabla 62 muestra los ángulos obtenidos de los mismo tres pit.

*Tabla 61: Comparación de tonelaje y beneficio entre pits finales y diseño semiautomático.*

| Resultado             | UPIT      | EastNeg | Semiautomático | Unidad |
|-----------------------|-----------|---------|----------------|--------|
| Tonelaje total        | 237.939   | 208.026 | 211.111        | Mt     |
| Diferencia            | 0         | -12.58  | -11.28         | %      |
| Tonelaje mineral      | 105.861   | 91.370  | 93.506         | Mt     |
| Diferencia            | 0         | -13.69  | -11.68         | %      |
| Tonelaje estéril      | 132.078   | 116.655 | 117.605        | Mt     |
| Diferencia            | 0         | -11.68  | -10.96         | %      |
| Razón estéril/mineral | 1.24      | 1.27    | 1.25           | -      |
| Beneficio total       | 1,075.124 | 943.955 | 962.696        | MUSD   |
| Diferencia            | 0         | -12.21  | -10.46         | %      |

Al incorporar la rampa en la posición EastNeg, el diseño a soporte de bloques muestra una reducción significativa del tonelaje total de 12.6 % y del tonelaje mineral de 13.7 %, acompañada de una disminución del tonelaje de estéril de 11.7 %. Como resultado, el beneficio total disminuye a 944 MUSD, equivalente a una caída de 12.2 % respecto del UPIT, mientras que la razón estéril/mineral aumenta levemente de 1.24 a 1.27.

El diseño semiautomático presenta una leve recuperación respecto del caso EastNeg a soporte de bloques. El tonelaje total alcanza 211.1 Mt, con 93.5 Mt de mineral, y el tonelaje de estéril se reduce en 11.0 % respecto del UPIT. La razón estéril/mineral disminuye a 1.25, indicando una geometría ligeramente más eficiente. Desde el punto de vista económico, el beneficio total aumenta a 963 MUSD, reduciendo la pérdida a 10.5 % respecto del UPIT y superando el desempeño del pit a soporte de bloques con rampa.

Tabla 62: Comparación de ángulos entre pits finales, diseño semiautomático y teóricos.

| Resultado | UPIT  | EastNeg | Semiautomático | Teórico |
|-----------|-------|---------|----------------|---------|
| Norte     | 52.39 | 47.90   | 53.29          | 55.1    |
| Sur       | 50.07 | 46.60   | 47.70          | 52      |
| Este      | 52.09 | 46.93   | 49.68          | 52      |
| Oeste     | 52.28 | 46.80   | 50.36          | 55.1    |
| Noreste   | 51.66 | 46.06   | 47.72          | 52      |
| Suroeste  | 52.52 | 46.15   | 47.78          | 52      |
| Noroeste  | 51.70 | 47.94   | 53.54          | 55.1    |
| Sureste   | 49.74 | 46.94   | 48.85          | 52      |

El diseño EastNeg a soporte de bloques muestra una reducción sistemática de los ángulos globales respecto del UPIT. En la mayoría de las direcciones, los ángulos se sitúan entre 46.1° y 47.9°, generándose diferencias del orden de 4° a 8° respecto de los ángulos teóricos.

El diseño semiautomático evidencia una recuperación parcial de los ángulos globales. En direcciones como Norte con 53.29° y Noroeste con 53.54°, los ángulos se aproximan o alcanzan los valores teóricos, mientras que en otras direcciones los valores se mantienen por debajo, con diferencias generalmente inferiores a 4°. En términos generales, el suavizado semiautomático reduce la dispersión observada en el pit a soporte de bloques y genera una geometría más homogénea, aunque sin reproducir de manera uniforme los ángulos teóricos en todas las direcciones.

### 5.3.4 SouthPos

En cuarto lugar, se obtiene los datos para el caso SouthPos, la Tabla 63 muestra la comparación entre los tonelajes y beneficio del UPIT, pit final del NorthPos y el pit suavizado, mientras la Tabla 64 muestra los ángulos obtenidos de los mismo tres pit.

Tabla 63: Comparación de tonelaje y beneficio entre pits finales y diseño semiautomático.

| Resultado             | UPIT      | SouthPos | Semiautomático | Unidad |
|-----------------------|-----------|----------|----------------|--------|
| Tonelaje total        | 237.939   | 218.336  | 225.986        | Mt     |
| Diferencia            | 0         | -8.24    | -5.03          | %      |
| Tonelaje mineral      | 105.861   | 95.365   | 96.231         | Mt     |
| Diferencia            | 0         | -9.92    | -9.10          | %      |
| Tonelaje estéril      | 132.078   | 122.970  | 129.755        | Mt     |
| Diferencia            | 0         | -6.90    | -1.76          | %      |
| Razón estéril/mineral | 1.24      | 1.29     | 1.35           | -      |
| Beneficio total       | 1,075.124 | 965.636  | 935.353        | MUSD   |
| Diferencia            | 0         | -10.19   | -13.01         | %      |

Al incorporar la rampa en la posición SouthPos, el diseño a soporte de bloques muestra una reducción del tonelaje total de 8.2 % y del tonelaje mineral de 9.9 %, acompañada de una disminución del tonelaje de estéril del 6.9 %. Como resultado, el beneficio total disminuye a 966 MUSD, equivalente a una caída de 10.2 % respecto del UPIT, mientras que la razón estéril/mineral aumenta de 1.24 a 1.29, indicando una extracción ligeramente menos eficiente.

El diseño semiautomático presenta una leve recuperación respecto del caso SouthPos a soporte de bloques. El tonelaje total alcanza 226.0 Mt, con 96.2 Mt de mineral, y el tonelaje de estéril se reduce en 1.8 % respecto del UPIT. La razón estéril/mineral aumenta a 1.35, lo que refleja que el suavizado incorpora bloques marginales con mayor estéril por tonelada de mineral. Desde el punto de vista económico, el beneficio total disminuye a 935 MUSD, reduciendo el desempeño respecto del escenario a soporte de bloques, con una caída de 13.0 % respecto del UPIT.

Tabla 64: Comparación de ángulos entre pits finales, diseño semiautomático y teóricos.

| Resultado | UPIT  | SouthPos | Semiautomático | Teórico |
|-----------|-------|----------|----------------|---------|
| Norte     | 52.39 | 48.11    | 49.95          | 53.7    |
| Sur       | 50.07 | 46.66    | 48.42          | 53.7    |
| Este      | 52.09 | 49.07    | 47.87          | 50.8    |
| Oeste     | 52.28 | 47.35    | 51.04          | 53.7    |
| Noreste   | 51.66 | 47.39    | 47.71          | 53.7    |
| Suroeste  | 52.52 | 48.13    | 51.31          | 53.7    |
| Noroeste  | 51.70 | 47.42    | 51.36          | 53.7    |
| Sureste   | 49.74 | 48.01    | 46.29          | 50.8    |

El diseño SouthPos a soporte de bloques con rampa muestra una reducción sistemática de los ángulos globales respecto del UPIT. En la mayoría de las direcciones, los ángulos se sitúan entre 46.7° y 49.1°, generándose diferencias de hasta 6° respecto de los valores teóricos. Este comportamiento refleja el efecto de la ubicación de la rampa y las restricciones geométricas asociadas al diseño, que tienden a suavizar los flancos del pit y reducir las pendientes máximas.

El diseño semiautomático evidencia una recuperación parcial de los ángulos globales. En direcciones como Oeste con 51.04°, Suroeste 51.31° y Noroeste 51.36°, los ángulos se aproximan a los valores teóricos, mientras en otras direcciones, como Sureste 46.29° y Este 47.87°, los valores se mantienen por debajo, con diferencias generalmente inferiores a 4°. En términos generales, el suavizado semiautomático disminuye la dispersión observada en el pit a soporte de bloques y genera una geometría más homogénea, aunque sin reproducir de manera uniforme los ángulos teóricos en todas las direcciones.

### 5.3.5 WestNeg

Por último, se obtiene los datos para el caso WestNeg, la Tabla 65 muestra la comparación entre los tonelajes y beneficio del UPIT, pit final del NorthPos y el pit suavizado, mientras la Tabla 66 muestra los ángulos obtenidos de los mismo tres pit.

*Tabla 65: Comparación de tonelaje y beneficio entre pits finales y diseño semiautomático.*

| Resultado             | UPIT      | WestNeg | Semiautomático | Unidad |
|-----------------------|-----------|---------|----------------|--------|
| Tonelaje total        | 237.939   | 212.007 | 220.994        | Mt     |
| Diferencia            | 0         | -10.90  | -7.13          | %      |
| Tonelaje mineral      | 105.861   | 92.888  | 95.316         | Mt     |
| Diferencia            | 0         | -12.26  | -9.97          | %      |
| Tonelaje estéril      | 132.078   | 119.118 | 125.678        | Mt     |
| Diferencia            | 0         | -9.82   | -4.85          | %      |
| Razón estéril/mineral | 1.24      | 1.28    | 1.35           | -      |
| Beneficio total       | 1,075.124 | 950.252 | 938.458        | MUSD   |
| Diferencia            | 0         | -11.62  | -12.72         | %      |

Al incorporar la rampa en la posición WestNeg, el diseño a soporte de bloques evidencia una reducción del tonelaje total de 10.9 % y del tonelaje mineral de 12.3 %, junto con una disminución del tonelaje de estéril de 9.8 %. Como resultado, el beneficio total disminuye a 950 MUSD, lo que representa una caída de 11.6 % respecto del UPIT, mientras que la razón estéril/mineral aumenta de 1.24 a 1.28.

El diseño semiautomático muestra una recuperación parcial del tonelaje total, alcanzando 221.0 Mt, con 95.3 Mt de mineral. No obstante, la razón estéril/mineral aumenta hasta 1.35, reflejando una geometría menos restrictiva. Desde el punto de vista económico, el beneficio total del caso semiautomático alcanza 938 MUSD, lo que implica una disminución de 12.7 % respecto del UPIT y un desempeño inferior al caso WestNeg a soporte de bloques.

Tabla 66: Comparación de ángulos entre pits finales, diseño semiautomático y teóricos.

| Resultado | UPIT  | WestNeg | Semiautomático | Teórico |
|-----------|-------|---------|----------------|---------|
| Norte     | 52.39 | 45.55   | 49.77          | 52      |
| Sur       | 50.07 | 47.76   | 52.46          | 55.1    |
| Este      | 52.09 | 47.45   | 48.60          | 52      |
| Oeste     | 52.28 | 47.73   | 48.56          | 52      |
| Noreste   | 51.66 | 46.44   | 48.36          | 55.1    |
| Suroeste  | 52.52 | 48.92   | 49.49          | 55      |
| Noroeste  | 51.70 | 46.07   | 48.95          | 52      |
| Sureste   | 49.74 | 47.45   | 47.17          | 52      |

El diseño WestNeg a soporte de bloques con rampa muestra una reducción generalizada de los ángulos globales respecto del UPIT. En la mayoría de las direcciones, los ángulos se sitúan entre 45.6° y 48.9°, generándose diferencias de hasta 6° respecto de los valores teóricos. Este comportamiento refleja el efecto de la ubicación de la rampa y de las restricciones geométricas asociadas al diseño, que tienden a suavizar las caras del pit y reducir las pendientes máximas.

El diseño semiautomático evidencia una recuperación parcial de los ángulos globales. En direcciones como Sur con 52.46°, Noroeste 48.95° y Norte 49.77°, los ángulos se aproximan a los valores teóricos, mientras en otras direcciones, como Sureste con 47.17° y Noreste con 48.36°, los valores se mantienen por debajo, con diferencias generalmente menores a 4°. En términos generales, el suavizado semiautomático disminuye la dispersión observada en el pit a soporte de bloques y genera una geometría más homogénea, aunque sin lograr los ángulos teóricos en todas las direcciones.

### 5.3.6 Análisis conjunto caso de estudio N°2

Al igual que el caso de estudio N°1, el UPIT se utiliza como referencia teórica, mientras que los pit a soporte de bloques con rampa y sus versiones suavizadas permiten evaluar la factibilidad geométrica y económica de los diseños obtenidos.

El cambio del tonelaje total, tonelaje mineral y beneficio económico observada en los distintos escenarios del caso de estudio N°2 no responde únicamente a la incorporación de rampas, sino principalmente a la geometría del pit a soporte de bloques en los niveles inferiores. Tal como se aprecia en las vistas de perfil, el pit a soporte de bloques presenta en profundidad una geometría excesivamente delgada que no logra cumplir con un ancho operacional mínimo compatible con un diseño realista de explotación. Esta condición genera que, al aplicar el proceso de suavizado semiautomático, la base del pit deba redefinirse a una cota superior, iniciándose aproximadamente en la cota 35, lo que implica la exclusión de volumen mineral presente en los niveles más profundos del pit a soporte de bloques.

Como consecuencia de lo anterior, los diseños semiautomáticos deberían mostrar reducciones sistemáticas del tonelaje total, algo que no se aprecia, al contrario, todos los pit muestran un tonelaje mayor, estos aumentos puede deberse a un bajo ángulo global producto de los parámetros geométricos escogido para el suavizamiento. En cuanto a los beneficios la mayoría se vio disminuido respecto a su respectivo pit a soporte de bloques, exceptuando el EastNeg, ambos casos tienen concordancia con el aumento o disminución de la razón estéril/mineral, ya que si esta razón aumenta el beneficio tiende a descender, mientras que si aumenta el beneficio tiende a bajar.

En relación con los ángulos, los resultados muestran que, pese a que los ángulos globales del diseño suavizado se aproximan a los valores teóricos, el modelo presenta ángulos interrampa del orden de 60°, los cuales pueden considerarse elevados para un diseño operativo, produciendo de esta manera posibles riesgos geomecánicos y limitaciones de diseño. De igual manera los ángulos tienden a ser más altos que del pit a soporte de bloques, lo que sugiere un pit más estrecho, generando una contradicción con las ideas anteriores, aunque este dato al ser manual podría no ser tan confiable.

## 6. Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

### 6.1. Conclusiones

En la presente memoria se evaluó una metodología semiautomática para el diseño de rampas en minería a cielo abierto, aplicada sobre pits a soporte de bloques, con el objetivo de analizar su impacto técnico, económico y geométrico. La metodología fue aplicada a dos casos de estudio con características geométricas distintas, lo que permitió evaluar su comportamiento bajo diferentes condiciones de diseño.

Los resultados obtenidos en el Caso de Estudio 1 muestran que el diseño semiautomático logra mantener valores de tonelaje y beneficio económico cercanos a los pits a soporte de bloques. Las diferencias observadas se explican principalmente por ajustes geométricos locales asociados al suavizado del diseño, sin evidenciar pérdidas relevantes de mineral ni deterioro significativo del valor del proyecto. Esto indica que, cuando el pit a soporte de bloques presenta una geometría razonablemente compatible con criterios operacionales, el suavizado posterior constituye una herramienta efectiva para transformar el diseño en un rajo operacionalmente viable.

En contraste, el Caso de Estudio 2 presenta cambios más significativos tanto en tonelaje como en beneficio económico para los diseños a soporte de bloques y semiautomáticos, en comparación con el pit de referencia. Estas pérdidas no se asocian totalmente a la metodología semiautomática en sí, sino a la geometría inicial del pit a soporte de bloques, particularmente en la base del rajo, donde se observan configuraciones excesivamente delgadas que no cumplen con anchos operacionales mínimos. Esta condición obliga a iniciar el diseño suavizado a cotas superiores, dejando mineral potencialmente explotable fuera del diseño final. Esta característica del pit a soporte de bloques no permite hacer una evaluación más efectiva, debido a que no sabe qué porcentaje de las diferencias encontradas se debe al cambio de cota y cual a la geometría del pit.

El análisis geométrico de ángulos muestra comportamientos diferenciados entre ambos casos. En el Caso de Estudio 1, los ángulos globales obtenidos se mantienen dentro de rangos coherentes con el diseño teórico. En el Caso de Estudio 2, en cambio, los pits a soporte de bloques presentan geometrías más agresivas, identificándose ángulos interrampa del orden de  $60^\circ$ , valores elevados desde el punto de vista del diseño minero, que refuerzan la necesidad de incorporar restricciones operacionales desde etapas tempranas.

Finalmente, los resultados evidencian la importancia del criterio utilizado en el ajuste del pit suavizado respecto del pit a soporte de bloques que le da origen. Se observa que pequeñas diferencias en la forma en que se realiza este ajuste pueden generar variaciones relevantes en los indicadores técnicos y económicos. En particular, en el Caso de Estudio 1, los diseños suavizados presentan resultados de

beneficio superiores a sus respectivos pits a soporte de bloques, lo que sugiere que el proceso de suavizado no solo corrige aspectos geométricos, sino que también puede modificar de manera importante la recuperación de mineral o estéril. En este contexto, se vuelve relevante definir y aplicar un criterio único y consistente para el ajuste entre ambos tipos de diseño, de modo de asegurar comparabilidad entre escenarios y evitar que las diferencias observadas respondan principalmente a decisiones de ajuste geométrico más que a la metodología de diseño evaluada.

## **6.2. Recomendaciones**

Se recomienda incorporar criterios operacionales, tales como ancho mínimo de rampa, radios de giro y anchos operacionales desde las primeras etapas de generación de pit a soporte de bloques, con el fin de reducir ajustes posteriores y evitar pérdidas artificiales de tonelaje durante el suavizado del diseño.

Asimismo, se aconseja realizar una revisión geométrica temprana de los pit a soporte de bloques, enfocada en la configuración de ángulos tanto interrampa como global, de modo de evitar geometrías inviables y permitir un ajuste más técnico y preciso.

Usar la metodología semiautomática como complemento al diseño manual, con la intención de reduciendo tiempos y aumentando sistematicidad.

## **6.3. Trabajo futuro**

Como trabajo futuro, se propone extender la metodología a pit multifase, incorporando secuencias de extracción en el tiempo. Esto permitiría evaluar la evolución del rajo y optimizar la planificación minera. Además, se busca integrar el diseño de rampas entre fases para asegurar continuidad operacional. También se podrían considerar variaciones geotécnicas como cambios en el ángulo interrampa y global. En conjunto, esto apunta a un diseño más robusto y económicamente eficiente.

También se propone incorporar parámetros económicos dinámicos que permitan generar un diseño secuencial más realista en el tiempo. Esto incluye la variación de precios, costos operacionales y leyes de corte. De esta forma, el diseño del rajo se adapta a condiciones económicas cambiantes. Además, se mejora la toma de decisiones en la planificación minera. Esto apunta a lograr una optimización más representativa del valor del proyecto.

De igual manera evaluar la metodología en faenas mineras reales, contrastándola con datos operacionales. Esto permitirá validar su aplicabilidad e identificar brechas entre diseño y operación. Así se busca mejorar la precisión y confiabilidad de la metodología.

## 7. Referencias

- Alfaro Cortés, M. (2009). Efecto de Aplicación de Leyes de Corte en el Cálculo de un Programa de Producción. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103387>
- Asbún, F., Alledes, I., Manriquez, F. (2025). Automatic ramp design on open pit mines: an study case. Universidad Técnica Federico Santa María
- Couzens, T. (1979). Aspects of production planning: Operating layout and phase plans.
- Díaz, C. (2017) Planificación minera a cielo abierto considerando diseño óptimo de rampas. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/146684>
- Herbert, J. H. (2018). Conceptos y fundamentos de planificación minera. <https://doi.org/10.20868/upm.book.84170>
- Hustrulid, W., Kutcha, M., & Martin, R. (2013). open pit mine planning & design (3.<sup>a</sup> ed.).
- Maptek Vulcan. (2025). Maptek. <https://www.maptek.com/cl/productos/vulcan/>
- Morales, N., Nelis, G., & Amaya, J. (2023). An efficient method for optimizing nested open pits with operational bottom space. International Transactions In Operational Research, 31(3), 1609-1630. <https://doi.org/10.1111/itor.13390>
- Nancel-Penard, P., Parra, A., Morales, N., Díaz, C., & Widzyk-Capehart, E. (2019). Value-optimal desing of ramps in open pit mining.
- Newman, A. M., Rubio, E., Caro, E., Weintraub, A., & Eureka, K. (2010). A review of operations research in mine planning. Interfaces, 40(3), 222–245. <https://doi.org/10.1287/inte.1090.0492>
- Sanhueza, P. (2018). Metodología para el diseño semi automático y optimizado de rampas en múltiples fases en minería a cielo abierto.
- Troncoso, R. (2016). *Apuntes de clase: Planificación minera de largo plazo* [Material docente, Universidad de Chile].
- Troncoso, R. (2017). *Diseño minero: Integración de planificación y diseño en minería a cielo abierto* [Material docente, Universidad de Chile].
- Vargas Vierling, E. (2014). Cálculo de envolvente económica para minas de caving bajo incertidumbre geológica. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/131918>
- Wetherelt, A., & van der Wielen, K. P. (2011). Introduction to Open-Pit Mining. En SME Mining Engineering Handbook