



**UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL DE MINAS**

**DETERMINACIÓN DE FLOTA DE TRANSPORTE EN
MINERÍA A CIELO ABIERTO MEDIANTE EL SOFTWARE
MINE PLANNING SUITE**

**MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE
MINAS**

**PROF. GUÍA: Kenji Naito Chiang
PROF. CO-GUÍA: Carlos Moraga Cruz**

ELÍAS ENRIQUE ARAVENA MAUREIRA

CURICÓ - CHILE

2018

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Two circular stamps and handwritten signatures. The left stamp is from the 'DIRECCIÓN SISTEMA DE BIBLIOTECAS UNIVERSIDAD DE TALCA' and the right stamp is from the 'SISTEMA DE BIBLIOTECAS CAMPUS CURICO'.

Curicó, 2020

DEDICATORIA

(A mi madre, abuela y hermana, por
su apoyo incondicional.)

RESUMEN

La presente investigación determina el número de camiones de extracción para el transporte de material de una operación minera a cielo abierto, lo que es una etapa iterativa y recurrente en la planificación minera, según los cambios que presenta la operación de la mina. Para ello se utiliza el conjunto de herramientas Mine Planning Suite, un *software* diseñado especialmente para las áreas de planificación de distintas empresas mineras.

El trabajo se limita a ser realizado en un horizonte de planificación de corto plazo, dejando fuera del alcance la planificación de largo y mediano plazo, índices operaciones, diseño y localización de los destinos. El procesamiento de minerales se limita a una planta concentradora, con recepción de mineral en dos chancadores. Se limita el sistema de transporte a los equipos de carguío y camiones de extracción, dejando fuera del alcance operaciones con equipos auxiliares. Con respecto a la flota de transporte no se realiza una selección técnica ni económica y se asume una capacidad nominal de los equipos de 350 toneladas.

El dinamismo que presenta la planificación minera y su conjunto de operaciones debido al crecimiento de la mina implica que no sea una tarea sencilla la determinación de la flota de transporte, por lo cual se destaca la rapidez con la que las herramientas permiten desarrollar y ver reflejado estos cambios.

Con el conjunto de herramientas utilizadas en el desarrollo del trabajo se determina la cantidad de material a ser removido en cada período con sus correspondientes destinos, los tiempos de ciclo promedios por período y la dimensión de la flota de transporte, la cual es contrastada con la metodología tradicional de estimación, siendo el tamaño de flota similar en un 75% de los períodos en análisis, mientras que el 25% restante, la estimación mediante la herramienta determina un camión extra.

PALABRAS CLAVES: Planificación, Cielo Abierto, Transporte.

ABSTRACT

The present investigation determines the number of extraction trucks for the transport of material from an open pit mining operation, which is an iterative and recurrent stage in the mining planning, according to the changes presented by the operation of the mine. For this, the Mine Planning Suite toolset is used, a software specially designed for the planning areas of different mining companies.

The work is limited to be done in a short-term planning horizon, leaving out of reach the median and long-term planning, operation rates, design and location of destinations. Mineral processing is limited to a concentrator plant, with mineral reception in two crushers. The transport system is limited to loading equipment and extraction trucks, leaving operations with auxiliary equipment out of reach. With respect to the transport fleet, no technical or economic selection is made and a nominal capacity of the 350-ton equipment is assumed.

The dynamism presented by the mining planning and its set of operations due to the growth of the mine implies that it is not an easy task to determine the transport fleet, which is why it stands out the speed with which the tools allow to develop and see reflected these changes.

With the set of tools used in the development of the work is determined the amount of material to be removed in each period with their corresponding destinations, average cycle times per period and the size of the transport fleet, which is contrasted with the traditional estimation methodology, being the fleet size similar in 75% of the periods under analysis, while the remaining 25%, the estimate using the tool determines an extra truck.

KEYWORDS: Planning, Open Pit, Haul.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	INTRODUCCIÓN	1
1.2	OBJETIVOS	2
1.2.1	Objetivo general	2
1.2.2	Objetivos específicos	2
1.3	ALCANCES	3
1.4	METODOLOGÍAS Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS.....	4
1.5	RESULTADOS ESPERADOS.....	6
1.6	ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	6
CAPÍTULO 2	DESARROLLO DEL TEMA	7
2.1	FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y ESTADO DEL ARTE.....	7
2.1.1	Planificación minera	7
2.1.2	Tiempo de ciclo de transporte	9
2.1.3	Determinación de flota	16
2.2	DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS UTILIZADOS	18
2.2.1	Caracterización de fases	18
2.2.2	Secuenciamiento de minado y plan de producción	23
2.2.3	Preparación gráfica	26
2.2.4	Agendamiento de destinos del material.....	31
2.2.5	Modelo de transporte	33
2.2.6	Dimensionamiento de flota de transporte.....	42
2.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS	43
CAPÍTULO 3	CONCLUSIONES	45
CAPÍTULO 4	BIBLIOGRAFÍA.....	46
CAPÍTULO 5	APÉNDICES.....	48
5.1	APÉNDICE A.....	48
5.2	APÉNDICE B.....	49
5.3	APÉNDICE C	61

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 Metodología Mine Planning Suite	5
FIGURA 2.1 Curva de tracción para determinar velocidades de transporte (Catálogo Caterpillar 797F)	12
FIGURA 2.2 Curva de retardo para determinar velocidades de transporte (Catálogo Caterpillar 797F)	13
FIGURA 2.3 Fase F1 (Vista superior). Obtenida vía MineSight 3D.....	21
FIGURA 2.4 Fase F2 (Vista superior). Obtenida vía MineSight 3D.....	22
FIGURA 2.5 Movimiento diario. Obtenida vía Serrucho	23
FIGURA 2.6 Movimiento mensual mina con ley de cobre. Obtenida vía Plan Process.....	24
FIGURA 2.7 Movimiento mensual por fase. Obtenida vía Plan Process	25
FIGURA 2.8 Serrucho de mineral expuesto. Obtenida vía Serrucho	26
FIGURA 2.9 Topografía inicial banco 2960. Obtenida vía Prepare Graphics Data	27
FIGURA 2.10 Topografía inicial intersectada con fase F1 banco 2960. Obtenida vía Prepare Graphics Data	28
FIGURA 2.11 Topografía post fase F1 intersectada con fase F2 banco 2960. Obtenida vía Prepare Graphics Data	29
FIGURA 2.12 Topografía final banco 2960. Obtenida vía Prepare Graphics Data	30
FIGURA 2.13 Distribución de material removido. Obtenido vía Plan Process.....	32
FIGURA 2.14 Puntos de origen y destinos. Obtenida vía MineHaul	34
FIGURA 2.15 Rutas de transporte iniciales. Obtenida vía MineHaul	35
FIGURA 2.16 Rutas de transporte para fase F1. Obtenida vía MineHaul	36
FIGURA 2.17 Rutas de transporte para fases F1 y F2. Obtenida vía MineHaul.....	38
FIGURA 2.18 Perfil de transporte por período. Obtenida vía MineHaul.....	41
FIGURA 2.19 Tiempos de ciclo promedios por período. Obtenida vía MineHaul	41
FIGURA 2.20 Cantidad de equipos por período. Obtenida vía MineHaul y metodología tradicional.	42

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 <i>Tiempo de acuatamiento en carguío</i>	10
TABLA 2.2 <i>Factores para disminuir velocidades máximas de traslado</i>	13
TABLA 2.3 <i>Tiempo de acuatamiento en descarga y tiempo de descarga</i>	14
TABLA 2.4 <i>Factores para tiempos de retorno vacío</i>	15
TABLA 2.5 <i>Caracterización de fases</i>	18
TABLA 2.6 <i>Toneladas por fase</i>	18
TABLA 2.7 <i>Bancos removidos por período</i>	25
TABLA 2.8 <i>Leyes por período</i>	32
TABLA 2.9 <i>Coordenadas de puntos de origen</i>	33
TABLA 2.10 <i>Coordenadas de puntos de destino</i>	34
TABLA 2.11 <i>Detalles de ruta de transporte para fase F1. Obtenida vía MineHaul</i>	37
TABLA 2.12 <i>Detalles de rutas de transporte para fase F2. Obtenida vía MineHaul</i>	39
TABLA 2.13 <i>Velocidades máximas de camiones de extracción</i>	39
TABLA 2.14 <i>Velocidades ingresadas a MineHaul</i>	40

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

El negocio minero ha permitido en Chile y en países productores tiempos provechosos. Durante tiempos de bonanza las empresas mineras han descuidado y elevado sus costos, significando esto que las empresas en épocas de bajos precios de los *commodities* sufran una disminución en sus utilidades. La tónica con las disminuciones de precios que han ocurrido durante los últimos períodos ha sido enfocar los esfuerzos en disminuir los costos de inversión y operación de la industria, siendo esta una lección de los últimos años, la cual se replicará en futuras generaciones para mantener al máximo las utilidades. Para empresas mineras que utilizan el método de explotación a cielo abierto, a medida que la mina aumenta su tamaño, las distancias que los camiones de extracción deben transportar el material se incrementan, disminuyendo el rendimiento de la flota de transporte, significando un impacto negativo en los costos operacionales y muchas veces implicando una nueva inversión en equipos. Chaowasakoo et. al. (2016) indica que los costos de transporte corresponden al 50%-60% de los costos operativos totales. Por este motivo es necesario determinar el tamaño de la flota de equipos de transporte de forma óptima, para ello se sigue una serie de etapas en donde se debe determinar la cantidad de material a mover, las distancias y tiempos del ciclo de transporte, entre otras variables que deben estimarse por período. Este conjunto de estimaciones permiten determinar costos de mantenimiento, inversión en neumáticos, entre otras variables importantes al momento de tomar decisiones sobre las ejecuciones de los proyectos.

En el presente trabajo se presenta una propuesta de metodología para determinar flota de camiones de extracción de un plan minero de corto plazo mediante el *software* Mine Planning Suite y sus herramientas: Serrucho, Prepare Graphics Data, Plan Process y MineHaul desarrollados por Dave Carkeet. En cada herramienta se analizan las problemáticas asociadas al transporte de material para el cumplimiento del plan de

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

producción de corto plazo. Para esto se confecciona un plan minero de corto plazo, el cual permite obtener las distancias variables que deben recorrer los equipos de transporte según el planeamiento de minado.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Determinar tamaño de la flota de transporte para una operación minera a cielo abierto en un horizonte de planificación de corto plazo.

1.2.2 Objetivos específicos

- Desarrollar una secuencia de minado en un horizonte de corto plazo.
- Asignar destinos al material a remover, según requerimientos de la planta concentradora.
- Modelar rutas de transporte y determinar tiempos de ciclo promedios por período.
- Determinar la cantidad de camiones necesarios para cumplir el plan de producción mediante el *software* Mine Planning Suite.
- Analizar y validar el dimensionamiento de la flota de transporte de MineHaul con el método tradicional.

1.3 ALCANCES

- La planificación de largo plazo no será discutida en este trabajo, pues se asume como una entrada en la planificación de corto plazo.
- Se asume que el procesamiento de los materiales se realiza solamente mediante una planta concentradora de sulfuros, por lo cual el material asignado a la línea de óxidos y línea ROM será descartado.
- El sistema de transporte consta de equipos de carguío y camiones de extracción.
- La selección técnica y económica de los equipos no se enmarca en los objetivos del proyecto.
- La flota de equipos de transporte será solamente de un tipo, sin especificar modelo o marca en específico. Se asumirá que este tipo de camión posee una capacidad nominal de 350 toneladas.
- Para los equipos de carguío se considera un solo tipo de pala, sin especificar modelo o marca en específico.
- Los índices operacionales como disponibilidad, índice de mantenimiento, índice de utilización, factor operacional, entre otros, están fuera del alcance del proyecto pues se asumen como entradas para la planificación de corto plazo.
- El diseño y localización de los botaderos y puntos de descarga para planta de concentración escapa de los alcances del proyecto, dado que se asume como datos de entrada en la planificación de corto plazo.
- Se consideran para el estudio los *softwares* disponibles para la Universidad de Talca: MineSight 3D y Mine Planning Suite.

1.4 METODOLOGÍAS Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS

Para cumplir con los objetivos del trabajo se posee una base de datos que consta de dos fases operativas: F1 y F2, con sus respectivas cubicaciones del modelo de bloques, con las cuales se generará un plan minero de corto plazo, los que generalmente abarcan horizontes de 1 o 2 años con una discretización de semanas o meses. El *software* Mine Planning Suite es un conjunto de herramientas que fue desarrollado por Dave Carkeet según los requerimientos de las áreas de planificación de distintas empresas mineras. No existe gran de información sobre su funcionamiento o sobre cómo se deben utilizar estas herramientas, siendo este trabajo pionero en detallar estas herramientas.

El secuenciamiento de minado, que se define por Ortiz et. al. (2001) como el conjunto de pasos a seguir detalladamente para completar la vida de la mina, se desarrolla de forma eficaz en la herramienta Serrucho que requiere como parámetro de entrada los períodos en los que se desarrollará el plan y la cubicación de las fases. La herramienta permite obtener de forma rápida una estimación de mineral expuesto, asegurando de esta forma la alimentación a la planta con mineral según la secuencia desarrollada.

La topografía inicial y las patas del diseño de fases deben ser procesadas primeramente en la herramienta Prepare Graphics Data que permite generar las medias lunas que modelan el aire al iniciar y tras la explotación de cada banco.

Posteriormente en la herramienta Plan Process deben asignarse los destinos del material a mover según el secuenciamiento de minado, para esto la herramienta satisface las condiciones solicitadas por la planta de procesamiento en cuanto a toneladas, recuperación, horas de procesamiento, entre otras. Determinando finalmente leyes de corte de planta y estableciendo los destinos del material.

Finalmente, el sistema de transporte debe ser modelado en la herramienta MineHaul a través del diseño de rutas, con la finalidad de poder estimar tiempos de ciclo de manera

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

determinística en base al plan de producción, sus principales resultados son cálculo de tiempos de ciclo, distancias totales, medias y equivalentes. Para modelar las velocidades el *software* utiliza un vector de velocidades fijas, generando una descomposición vectorial de éste, aplicándolo a las distintas pendientes que las rutas poseen, con esto es posible realizar las estimaciones de los tiempos de ciclo promedios por período del plan y el dimensionamiento de las flotas del plan minero.

En la figura 1.1 se describe el proceso desde que se poseen las fases operativas hasta obtener el dimensionamiento de la flota de transporte mediante las herramientas de Mine Planning Suite.

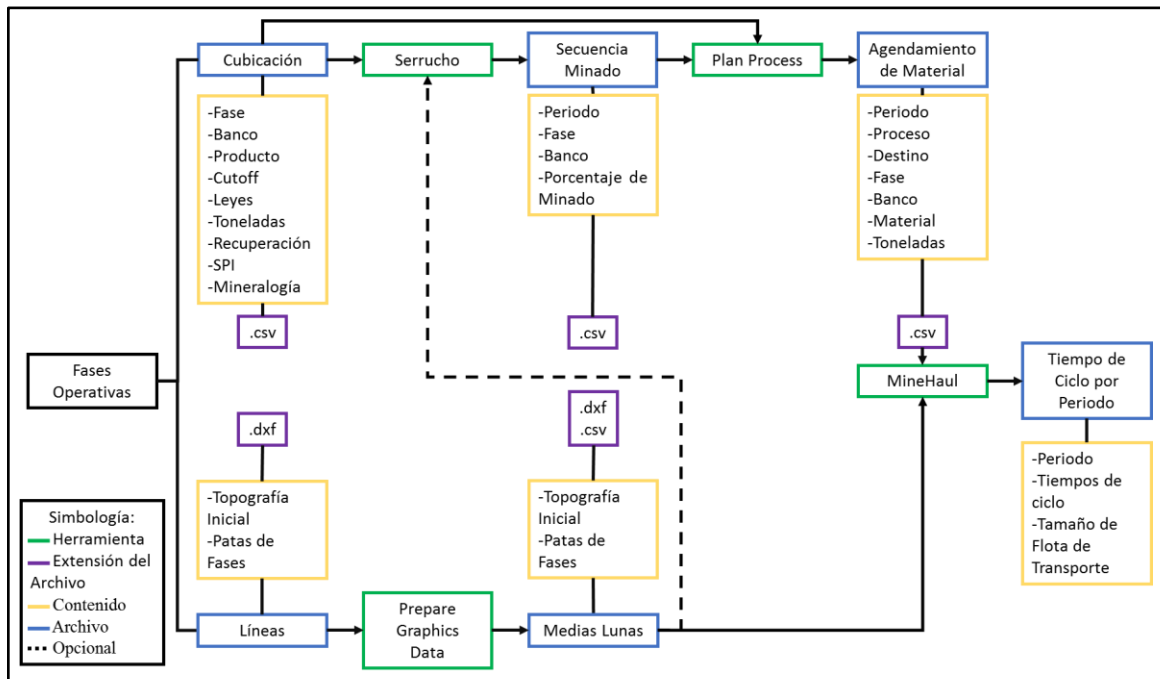


FIGURA 1.1 Metodología Mine Planning Suite

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.5 RESULTADOS ESPERADOS

Continuando con los lineamientos de los objetivos del trabajo, como principal resultado se determinará la cantidad de equipos de transporte tipo camiones de extracción necesarios para cumplir con el plan de producción mediante las herramientas de Mine Planning Suite, analizando y validando en cada etapa las metodologías utilizadas por las herramientas. Esta investigación permitirá a las áreas de planificación de corto plazo tener un antecedente de cómo se desarrollan las metodologías de las herramientas de Mine Planning Suite, permitiendo utilizar estas herramientas o similares en sus estimaciones según los criterios estudiados en el presente informe y sus requerimientos en la industria.

1.6 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

Este documento se compone de cuatro capítulos, el siguiente capítulo contiene el desarrollo de la investigación el cual se divide en tres secciones. La primera sección corresponde a la revisión bibliográfica necesaria para fundamentar teóricamente la investigación e indicar el estado del arte del tema a tratar. La segunda sección corresponde a una caracterización de los métodos utilizados, en ella se detalla el desarrollo de la investigación. La tercera sección indica los resultados obtenidos mediante las herramientas utilizadas.

El tercer capítulo corresponde a la presentación de conclusiones y recomendaciones para las metodologías utilizadas en la determinación de flotas de equipos de transporte.

CAPÍTULO 2 DESARROLLO DEL TEMA

2.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y ESTADO DEL ARTE

2.1.1 Planificación minera

La planificación minera se define como un proceso iterativo, mediante el cual los ingenieros de minas, desarrollan un plan de negocios, que permite a la compañía obtener mayores utilidades al explotar el yacimiento.

Según Rubio (2008, citado por Peirano 2011) el proceso de planificación minera sigue el objetivo de transformar los recursos minerales en un negocio que permita obtener las mayores utilidades al explotar el yacimiento. La planificación minera conecta las restricciones impuestas por el mercado y el entorno con las condiciones operacionales que permiten maximizar la renta económica del activo (Peirano, 2011).

Según Newman (2007, citado por Muñoz 2012) se puede separar el proceso de planificación de acuerdo a las características de las decisiones tomadas:

- **Estratégicas:** Referidas a la elección del método de explotación, la capacidad de mina, procesamiento y en general, las estimaciones de reservas mineras. Su objetivo consiste en sincronizar el mercado con los recursos disponibles y la misión de la compañía.
- **Tácticas:** Corresponde a la especificación de los procesos que se realizarán durante la vida de la mina, como programas de producción de largo plazo y los modelos de utilización de equipos y plantas de procesamiento. Su objetivo es obtener la forma de alcanzar el objetivo especificado en la planificación estratégica. Su

CAPÍTULO 2 DESARROLLO DEL TEMA

resultado es el plan minero, que define cómo y cuándo se extraerán los recursos, estableciendo los recursos humanos y materiales que se deben utilizar.

- Operativas: Se realizan con una frecuencia diaria, se incluyen los procesos e índices operativos resultantes del plan minero. Se genera una retroalimentación con las etapas anteriores de planificación.

Muñoz (2012) indica que con el objetivo de disminuir la incertidumbre y la escala espacial de los períodos del plan minero, éste se descompone en tres horizontes de planificación:

- Largo Plazo: Este horizonte define una envolvente económica en función de las reservas mineras disponibles, con las cuales se trabaja para construir un plan minero anual, estableciendo el tamaño de la mina, el método, ritmo, secuencia de explotación y perfil de leyes de corte. Esta etapa incluye variables promedio y generales, debido a que el tamaño del problema a resolver no permite mayor nivel de detalle.
- Mediano Plazo: Por lo general abarca un horizonte trianual y anual, produce planes de producción orientados a conseguir las metas productivas en el corto plazo definidas en la planificación de largo plazo. Asegura el presupuesto de operaciones y retroalimenta la planificación de largo plazo.
- Corto Plazo: La discretización de esta etapa puede ser diaria, semanal, mensual o trimestral. Se analizan los recursos utilizados en la operación de la mina. Recopila información operacional y retroalimenta la planificación de mediano y largo plazo.

Carvajal (2015) indica que la disponibilidad física, el rendimiento de los equipos, la capacidad de la flota, sus destinos y las redes de caminos se consideran como parámetros de entrada invariables para la planificación en un horizonte de corto plazo, por otro lado, los tiempos de ciclo corresponden a una variable que se debe estimar, pues permite distribuir la cantidad de equipos de carguío y transporte por trayecto para cumplir las

CAPÍTULO 2 DESARROLLO DEL TEMA

metas de producción, influyendo esta estimación directamente en el cumplimiento del plan de producción y en los costos asociados a la mina. Además el autor indica que dentro de la compañía en análisis, el área de planificación de corto plazo estima la productividad de la operación con los tiempos de ciclo como punto de partida, lo que nos indica que los planes de producción de corto plazo son confeccionados a partir de esta estimación, por lo cual debe ser lo más precisa posible, dado que repercutirá en toda la planificación de corto plazo, en donde se deben asignar los equipos y destinar los recursos para que la operación pueda cumplir el plan productivo.

2.1.2 Tiempo de ciclo de transporte

El tiempo de ciclo de transporte se define como el lapso de tiempo que transcurre desde que un equipo inicia su recorrido cargado, se traslada hacia su lugar de destino, descarga y finalmente vuelve al punto de partida, en donde está disponible nuevamente para ser cargado. En las operaciones mineras, en donde el material removido debe ser transportado cada vez a una distancia mayor, los tiempos de ciclo de los equipos de transporte tienden a aumentar considerablemente, por esto es necesario verificar estos incrementos e intentar mantener los tiempos estables durante los períodos, dado que esto repercute en la cantidad de equipos necesarios para cumplir con el plan de producción.

Douglas (1964) indica que el tiempo de ciclo de los vehículos corresponde a la suma del promedio de los tiempos de tránsito, tiempo de carga, tiempos de descarga. Excluyendo los tiempos de espera debidos a las congestiones en el trayecto.

Reátegui (2014) indica que el ciclo operativo de un equipo de transporte consta de dos partes:

- Los tiempos fijos son aquellos que permanecen constantes o presentan una variación despreciable durante el ciclo, independiente de las distancias que el

CAPÍTULO 2 DESARROLLO DEL TEMA

equipo deba recorrer, se compone de tiempo de carga, tiempo de descarga y tiempos de acuatamiento o maniobras.

- Los tiempos variables, son dependientes de las distancias que el equipo recorre, se compone de tiempo de viaje cargado y tiempo de viaje vacío.

Según Carvajal (2015) una ecuación detallada de los tiempos del ciclo de transporte:

$$T_{CT} = T_{AC} + T_C + T_{VC} + T_{AD} + T_D + T_{VV} + D \quad (2.1)$$

Donde:

T_{CT} : Tiempo de ciclo de transporte (min.)

T_{AC} : Tiempo de acuatamiento en carguío (min.)

T_C : Tiempo de carguío (min.)

T_{VC} : Tiempo de viaje cargado (min.)

T_{AD} : Tiempo de acuatamiento en descarga (min.)

T_D : Tiempo de descarga (min.)

T_{VV} : Tiempo de viaje vacío (min.)

D : Demoras (min.)

1. Tiempos de Acuatamiento en Carguío (T_{AC})

Según Ortiz (2004) “Estos tiempos dependen del tipo de equipo de transporte y de las condiciones de trabajo” (p. 35).

TABLA 2.1 *Tiempo de acuatamiento en carguío*

Tiempo según tipo de carguío (min.)			
Condiciones de Operación	Inferior	Trasera	Lateral
Favorables	0.15	0.15	0.15
Promedio	0.50	0.30	0.50

Desfavorables	1.00	0.50	1.00
----------------------	------	------	------

Tiempos referenciales de aculataamiento en punto de carguío según tipo de carguío y condiciones de operación (Ortiz, 2004)

2. Tiempo de Carguío (T_C)

“El tiempo de carga depende del número de paladas necesarias para llenar la capacidad del camión (o unidad de transporte)” (Ortiz, 2004, p.34).

Se determina según:

- Tiempo de ciclo de la pala ($T_{ciclo\ pala}$)
- Número de ciclos a ejecutar por la pala para cargar un camión (N_c)

$$T_C = T_{ciclo\ pala} * N_c \quad (2.2)$$

Donde:

$$N_c = \frac{\text{Capacidad del camión (ton)}}{\text{Capacidad cuchara pala (ton)}} \quad (2.3)$$

Según Ortiz (2004) “Se considera, en general, un mínimo de tres pasadas, y en la mayoría de los casos, entre cinco y seis pasadas es el óptimo” (p. 35).

3. Tiempo de Viaje Cargado (T_{VC})

Según Ortiz (2004) “La velocidad de transporte dependerá de la calidad y pendiente del camino y del peso del equipo de transporte y su carga” (p. 36).

Factores a considerar para determinar velocidad de traslado: Pendientes, condiciones de las vías, resistencia por pendiente, resistencia a rodar, peso del equipo, peso de la carga.

CAPÍTULO 2 DESARROLLO DEL TEMA

- La **resistencia por pendiente** corresponde a la tracción necesaria para ascender por un camino, corresponde al 1% del peso total del vehículo cargado por cada 1% de pendiente (Ortiz, 2004).
- La **resistencia a rodar** corresponde a la tracción necesaria para superar el roce entre neumáticos y la vía. Ejemplo, camino bien mantenido y seco de tierra y grava: resistencia 2% del peso total del vehículo cargado (Ortiz, 2004).
- La **pendiente efectiva** corresponde a la pendiente real del camino menos 1% por cada 10 kg/ton de resistencia a la rodadura (Ortiz, 2004).

La velocidad máxima con la que un camión puede desplazarse en un tramo con pendiente positiva puede calcularse con la curva de tracción del camión, las curvas son características de cada camión.

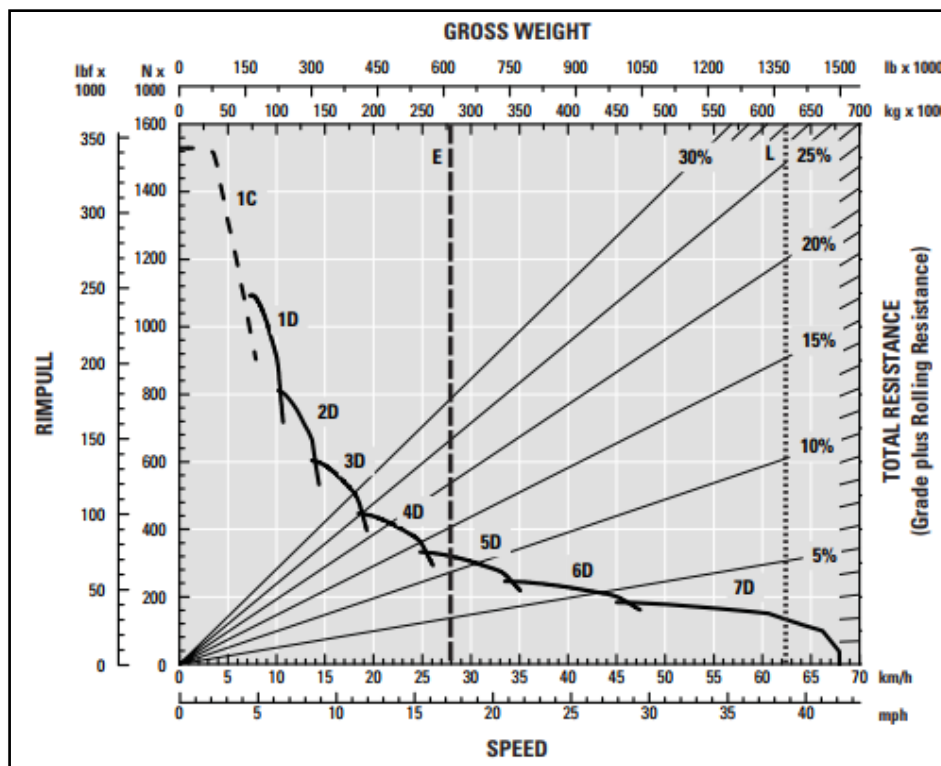


FIGURA 2.1 Curva de tracción para determinar velocidades de transporte (Catálogo Caterpillar 797F)

CAPÍTULO 2 DESARROLLO DEL TEMA

La velocidad máxima con la que un camión puede desplazarse en un tramo descendente puede calcularse con la curva de retardo del camión, las curvas son características de cada camión y está determinada por la capacidad de frenado del vehículo.

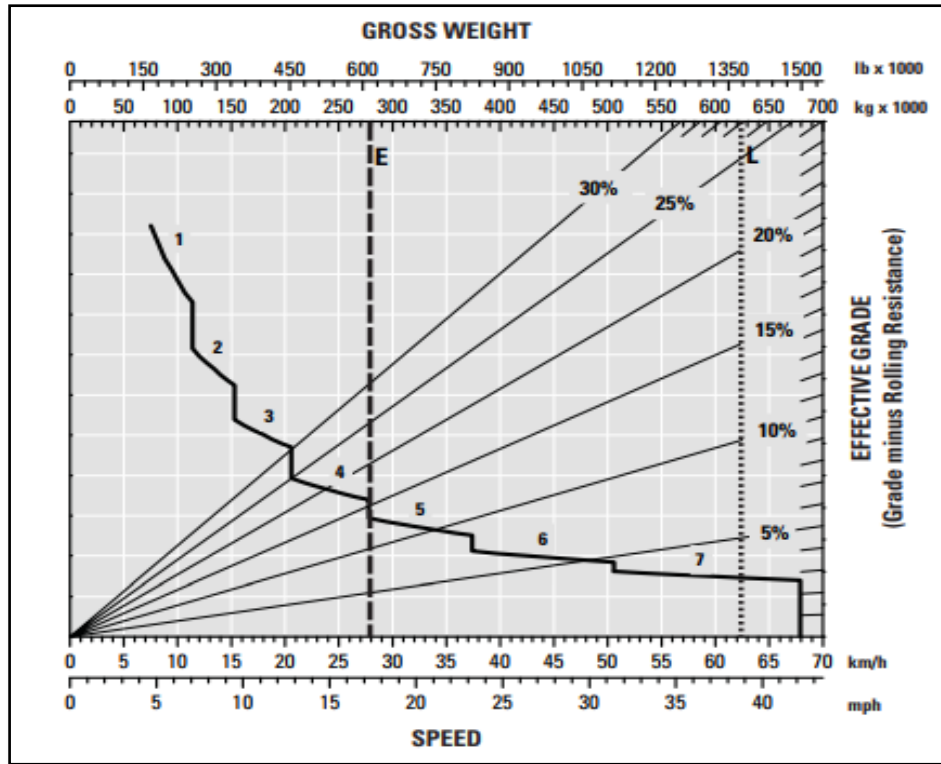


FIGURA 2.2 Curva de retardo para determinar velocidades de transporte (Catálogo Caterpillar 797F)

Es necesario considerar velocidades que representen un trabajo de forma real (las curvas entregan las velocidades máximas), por lo cual se debe aplicar un factor para disminuir estas según las distancias de traslado (Ortiz, 2004).

TABLA 2.2 Factores para disminuir velocidades máximas de traslado

Longitud de la sección de transporte (m)	Vías cortas y a nivel (150 – 300 m de largo total)	Unidad partiendo desde detención absoluta	Unidad en movimiento al entrar a la sección
0 – 100	0.20	0.25 – 0.50	0.50 – 0.70

CAPÍTULO 2 DESARROLLO DEL TEMA

100 – 230	0.30	0.35 – 0.60	0.60 -0.75
230 – 450	0.40	0.50 – 0.65	0.70 – 0.80
450 – 750		0.60 – 0.70	0.75 – 0.80
750 – 1000		0.65 – 0.75	0.80 – 0.85
Sobre 1000		0.70 – 0.85	0.80 – 0.90

Factores referenciales, permiten mejor estimación de velocidades promedios según datos obtenidos en figura 2.1 y figura 2.2.

4. Tiempo de Acuatamiento en Descarga y Tiempo de Descarga ($T_{AD} + T_D$)

“Este tiempo depende de las condiciones de trabajo y del tipo de descarga del equipo” (Ortiz, 2004, p.35).

TABLA 2.3 *Tiempo de acuatamiento en descarga y tiempo de descarga*

Tiempo según tipo de carguío (min.)			
Condiciones de Operación	Inferior	Trasera	Lateral
Favorables	0.30	1.00	0.70
Promedio	0.60	1.30	1.00
Desfavorables	1.50	1.50 – 2.00	1.50

Tiempos referenciales de acuatamiento y descarga, en punto de descarga según condiciones de descarga y condiciones de operación (Ortiz J. , 2004)

5. Tiempo de Viaje Vacío (T_{VV})

Ortiz (2004) indica la velocidad puede estar limitada por condiciones de trabajo o seguridad, en caso contrario aplicar la siguiente tabla a las curvas de la figura 2.1 y figura 2.2.

TABLA 2.4 Factores para tiempos de retorno vacío

Condiciones	Menos de 150 m	Sobre 150 m
Favorables	0.65	0.85
Promedio	0.60	0.80
Desfavorables	0.55	0.75

Factores para obtener velocidades promedio de regreso con equipos vacíos según condiciones de operación (Ortiz J. , 2004)

6. Demoras (*D*)

Los tiempos de demoras son referidos a los retrasos que sufren los camiones a su destino que se producen debido a la congestión (interacción entre camiones en un camino o por problemas de señalética) y a las colas que se producen en la espera de un servicio para ser atendidos (Carvajal, 2015).

Usualmente en las operaciones mineras los tiempos de ciclos son retroalimentados desde planificación de corto plazo a largo plazo para realizar ajustes en los planes generados por las compañías, según (Doig & Kizil, 2013) existen variados métodos para predecir los tiempos de ciclos aceptados por la industria, de los cuales destacan según sus requerimientos:

- Arena©, FPC© y Talpac©.
- Regresión múltiple y redes neuronales artificiales.
- Deswik y MineSchedTM.

Indican que Arena©, FPC©, Talpac©, redes neuronales artificiales y regresión múltiple típicamente permiten utilizar un solo camino de transporte en un período de tiempo, es por esto que estas metodologías son poco utilizadas en planes donde la secuencia presenta cambios significativos, implicando variaciones en las distancias a recorrer por los equipos de transporte. Para esto, indican que resulta positivo realizar estas simulaciones o estudios numéricos según las estrategias de carga y descarga definidas por MineSchedTM de Gemcom o la herramienta Dump Scheduler de Deswik.

2.1.3 Determinación de flota

Según (Marambio, 2010) existen distintas metodologías utilizadas para determinar el tamaño de la flota, de las cuales destacan:

- Modelos de simulación: Generalmente contempla definir variables aleatorias como tiempo de carga y descarga, la cantidad de carga, tiempo de interferencia, entre otras, las cuales siguen una determinada función de distribución. Los rendimientos de los equipos de transporte se definen como una función de la velocidad, pendiente de los caminos y condiciones de operación. Los tiempos de transporte son función de la cantidad de equipos y los tipos de equipos a utilizar. Como principal objetivo los modelos de simulación crean una representación de la realidad, en donde se pueden testar variaciones en los sistemas de carga-transporte. La construcción del modelo no implica necesariamente la recolección de datos, pero éstos si son necesarios para una correcta aplicación del modelo.
- Modelo de tiempos de ciclo o tradicional: Se utiliza una serie de cálculos bastante sencillos relacionados con la productividad requerida y los rendimientos de los equipos, éstos pueden desarrollarse en hojas de cálculo sin problemas. Según Marambio (2010), esta metodología es comúnmente usada en empresas mineras.

$$N^{\circ} \text{ Equipos} = \frac{T}{RP_t} \quad (2.4)$$

Donde:

T: Tonelaje total a mover por el período (ton)

RP_t: Rendimiento por período de un equipo de transporte (ton / período)

El rendimiento por período se define como:

CAPÍTULO 2 DESARROLLO DEL TEMA

$$RP_t = RH_t * HT * TD * DP \quad (2.5)$$

Donde:

RH_t: Rendimiento horario de un equipo de transporte (ton / hr)

HT: Horas trabajadas por turno (hr)

TD: Turnos trabajados por día (turnos / día)

DP: Días por período (días)

El rendimiento horario de un equipo de transporte se determina según:

$$RH_t = \frac{C_t * DF_t * UT_t * FO_t * 10^{-6}}{(T_{CT}/60)} \quad (2.6)$$

Donde:

C_t: Capacidad del equipo de transporte (ton)

DF_t: Disponibilidad física del equipo de transporte (%)

UT_t: Factor de utilización del equipo de transporte (%)

FO_t: Factor operacional del equipo de transporte (%)

T_{CT}: Tiempo de ciclo de transporte (min)

- Modelo probabilístico: Establece que el número de equipos de transporte debe ser la cantidad de camiones requeridos dividido en la disponibilidad de la flota. De forma tal que si se requieren 16 camiones para cumplir el plan, asumiendo una disponibilidad de 80%, la flota sea de 20 camiones. Posteriormente dicha cifra se somete a un análisis de probabilidad, en donde se determina la probabilidad que al menos se encuentre disponible la cantidad de camiones requeridos, con una distribución binomial, en donde se asigna la disponibilidad como la probabilidad de que un equipo esté disponible y como universo la flota obtenida de los camiones requeridos divididos en la disponibilidad, si esta probabilidad es baja, se aumenta el universo de la flota hasta obtener un 95% de probabilidad. Según el ejemplo anterior la probabilidad de que al menos 16 camiones de 20 estén disponibles con

CAPÍTULO 2 DESARROLLO DEL TEMA

un 80% de disponibilidad es 63%, si la probabilidad se quiere aumentar a un 95% se requieren 24 camiones como universo de flota.

2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS UTILIZADOS

2.2.1 Caracterización de fases

Para el estudio se utilizan dos fases que se encuentran en condiciones operacionales, de modo de poder asemejar lo más posible el estudio a lo ocurrido en empresas mineras, las fases F1 y F2 poseen rampas de 40 metros de ancho y sus condiciones se detallan en la tabla 2.5:

TABLA 2.5 *Caracterización de fases*

Fase	F1	F2
Tonelaje	123.04 Mton	366.82 Mton
N° de Bancos	9	28
Altura Bancos	30 m	30 m
Banco Inferior	2720 msnm	2960 msnm
Banco Superior	2960 msnm	3770 msnm

En la tabla 2.6 se detallan los tonelajes que deben ser extraídos en cada uno de los bancos de cada fase y el movimiento total mina por cada banco.

TABLA 2.6 *Toneladas por fase*

Banco	Tonelaje Fase F1 (Mton)	Tonelaje Fase F2 (Mton)	Total Mina (Mton)
2720	1.65		1.65
2750	5.07		5.07

CAPÍTULO 2 DESARROLLO DEL TEMA

2780	8.27		8.27
2810	12.38		12.38
2840	17.21		17.21
2870	20.19		20.19
2900	21.26		21.26
2930	19.48		19.48
2960	17.51	3.24	20.75
2990		3.56	3.56
3020		1.89	1.89
3050		4.49	4.49
3080		3.82	3.82
3110		7.12	7.12
3140		10.09	10.09
3170		15.18	15.18
3200		18.74	18.74
3230		24.70	24.70
3260		35.79	35.79
3290		24.05	24.05
3320		17.44	17.44
3350		22.38	22.38
3380		20.40	20.40
3410		24.75	24.75
3440		21.85	21.85
3470		30.83	30.83
3500		36.09	36.09
3530		18.05	18.05
3560		21.98	21.98
3590		0.03	0.03
3620		0.05	0.05
3650		0.01	0.01
3680		0.10	0.10

CAPÍTULO 2 DESARROLLO DEL TEMA

3710		0.07	0.07
3740		0.10	0.10
3770		0.02	0.02
Total	123.04	366.82	489.85

En la figura 2.3 y figura 2.4 se aprecian las patas y crestas de la fase F1 y F2 respectivamente.

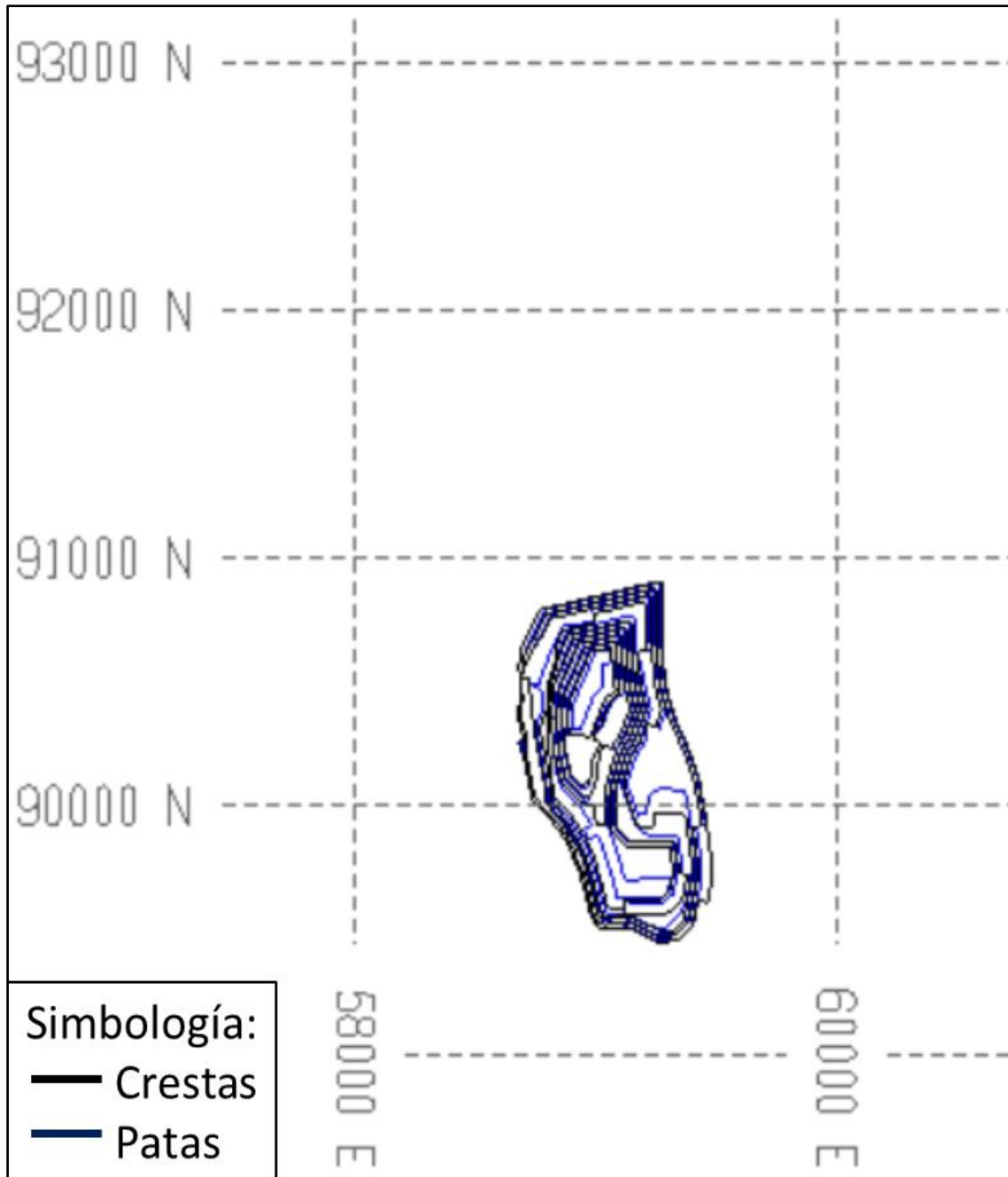


FIGURA 2.3 Fase F1 (Vista superior). Obtenida vía MineSight 3D

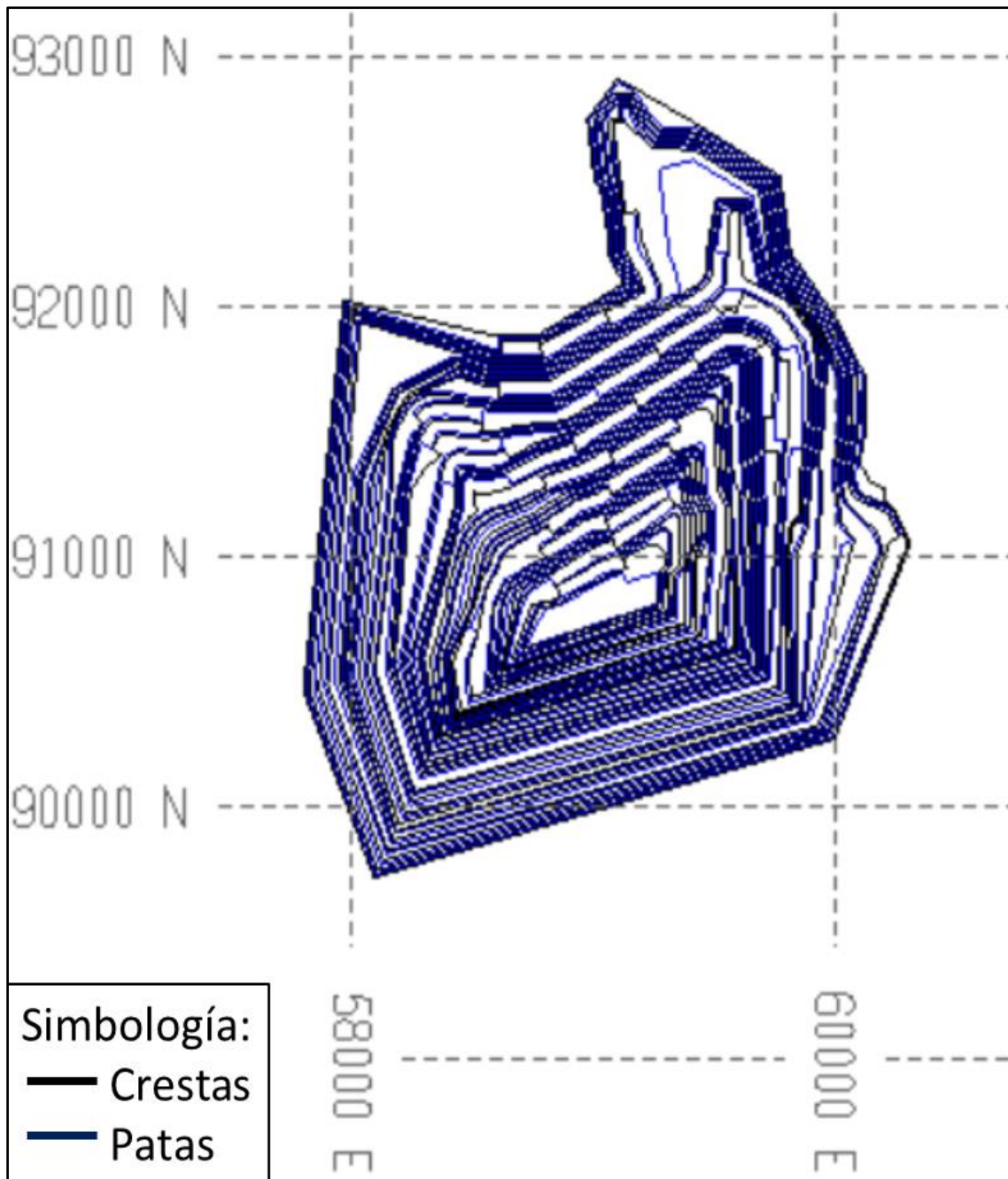


FIGURA 2.4 Fase F2 (Vista superior). Obtenida vía MineSight 3D

2.2.2 Secuenciamiento de minado y plan de producción

El plan de producción es generado con una discretización mensual para un año de producción (julio 2020 – junio 2021), en donde se asume que la producción diaria ronda las 350 ktpd a partir de cinco palas de un mismo tipo, que poseen una capacidad de carga cercana a 70 ktpd (los ritmos de las palas por período y por fase se detallan en el apéndice a. Estos se asumen como parámetro de entrada desde planificación de largo plazo), el plan contiene información como el agendamiento de los materiales, índices operacionales, ubicación de los equipos, entre otros. El plan asegura armonía entre la planificación de corto, mediano y largo plazo, para esto la herramienta Serrucho define una curva de mineral expuesto (apreciada en la figura 2.8), la que se define como la cantidad de mineral que se deja disponible para el próximo período al término del período actual, asegurando de esta forma la alimentación de mineral a la planta concentradora en todos los períodos, la cual requiere una cantidad de 200 ktpd para su procesamiento.

En la figura 2.5 se aprecia el material diario movido por la mina en cada período del plan, estos se obtienen según los ritmos de las palas de carguío.

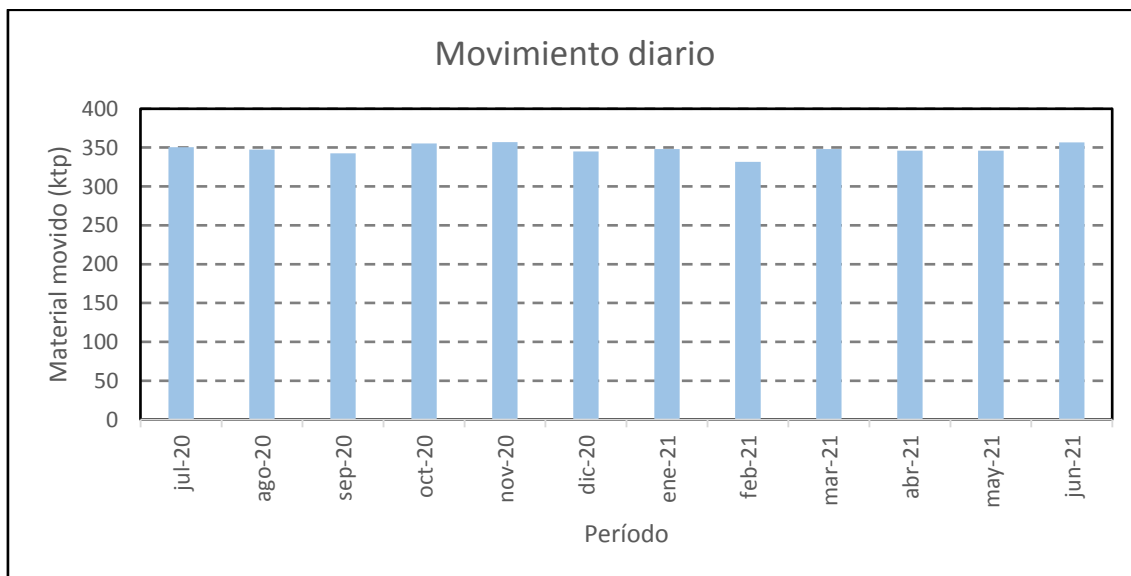


FIGURA 2.5 *Movimiento diario. Obtenida vía Serrucho*

CAPÍTULO 2 DESARROLLO DEL TEMA

En la figura 2.6 se aprecia el material total movido por la mina en cada período del plan, la cantidad movida por período se obtiene según los ritmos de las palas de carguío, además se intersecta en el gráfico la ley promedio de cobre para cada período, en donde se demuestra que la ley promedio para los períodos corresponde a 0,7% de cobre total.

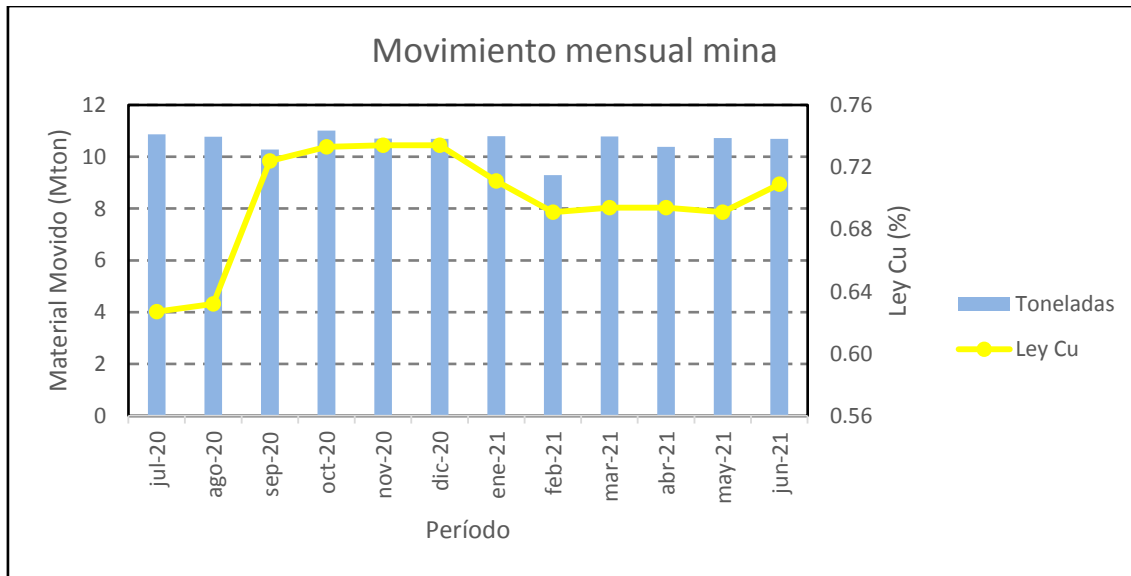


FIGURA 2.6 *Movimiento mensual mina con ley de cobre. Obtenida vía Plan Process*

En la figura 2.7 se aprecia el material movido de cada fase en los períodos del plan, la fase F1 es completamente consumida en febrero de 2021, lo que implica una disminución considerable en el movimiento mensual, el cual retoma valores cercanos a 10 Mton mensuales el siguiente período, mientras la fase F2 se mantiene en operación durante todos los períodos del plan.

CAPÍTULO 2 DESARROLLO DEL TEMA

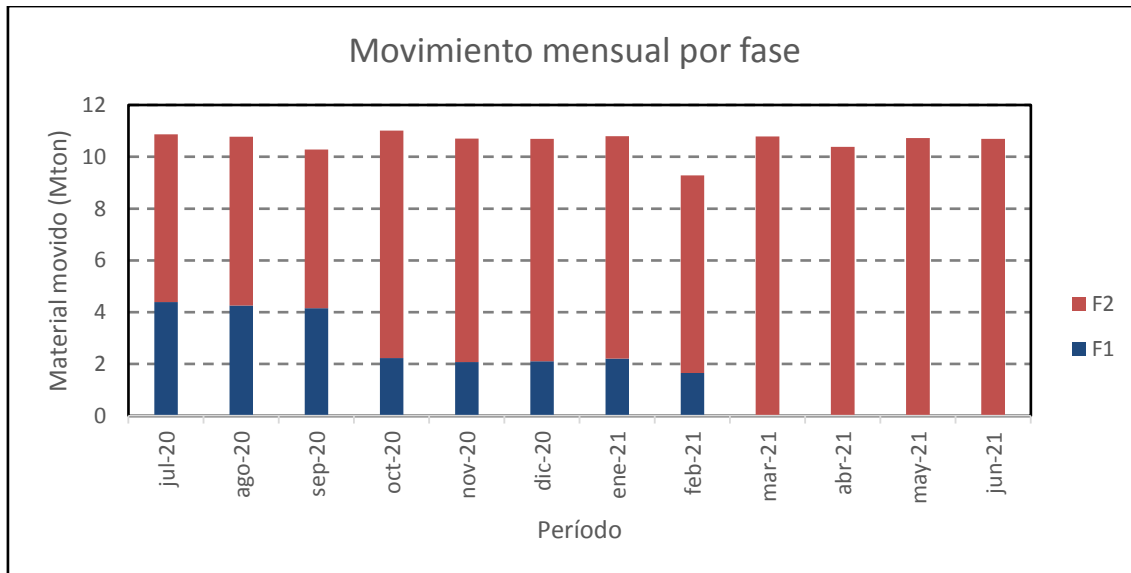


FIGURA 2.7 Movimiento mensual por fase. Obtenida vía Plan Process

En la tabla 2.7 se aprecia como avanzan los bancos en cada fase durante los distintos períodos, para esto la herramienta Serrucho cuenta con una visualización gráfica que ayuda a los planificadores a identificar de forma rápida como avanza la mina según la secuencia de minado, esto se puede apreciar en el apéndice b.

TABLA 2.7 Bancos removidos por período

Período\Fase	F1	F2
Julio 2020	2810	3530
Agosto 2020	2780	3500
Septiembre 2020	2780	3500
Octubre 2020	2780	3500
Noviembre 2020	2750	3500
Diciembre 2020	2750	3500
Enero 2020	2750	3470
Febrero 2020	2720	3470
Marzo 2020		3470
Abril 2021		3440
Mayo 2021		3440
Junio 2021		3410

CAPÍTULO 2 DESARROLLO DEL TEMA

En la figura 2.8 se aprecia el gráfico definido por la herramienta Serrucho para la secuencia de extracción definida, en la parte superior del gráfico se aprecia el mineral expuesto, en la parte inferior de éste se aprecia el material estéril remanente para cada fase.

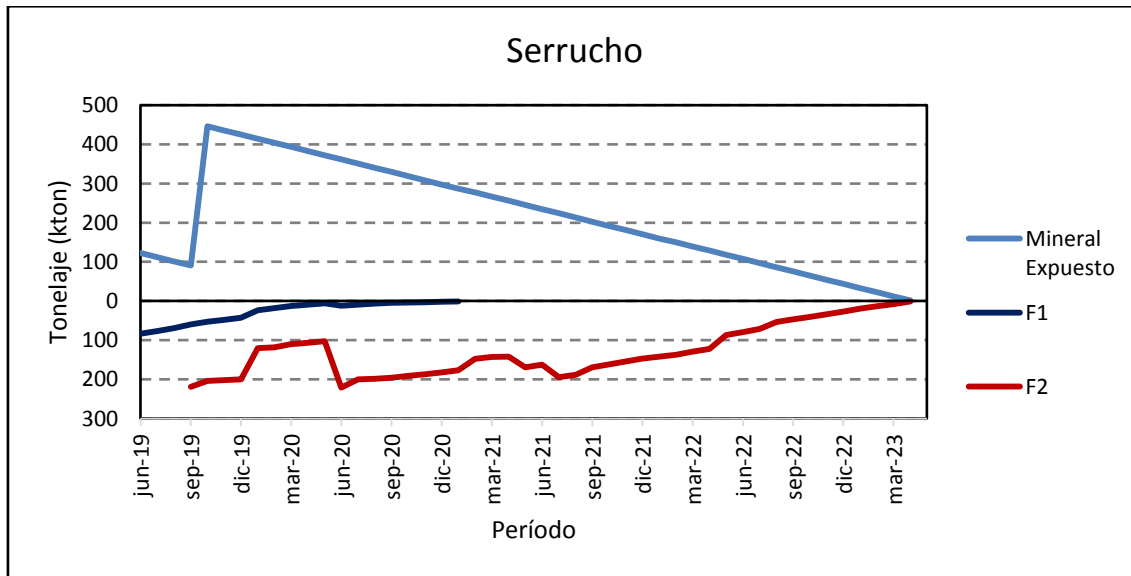


FIGURA 2.8 Serrucho de mineral expuesto. Obtenida vía Serrucho

2.2.3 Preparación gráfica

Para poder visualizar en la herramienta Serrucho el desarrollo de la mina según la secuencia de minado y para poder diseñar las rutas que poseen las fases en la herramienta MineHaul, es necesario cargar la topografía inicial y las fases a la herramienta Prepare Graphics Data, para ello es necesario agregar la topografía como curvas de nivel y las patas de los bancos de las fases a explotar. En la herramienta se debe modelar el aire (área del banco que ya ha sido extraído) a través de la topografía inicial, posteriormente se debe intersectar esta parte con la pata del banco de la fase a remover, esto se aprecia en las

CAPÍTULO 2 DESARROLLO DEL TEMA

siguientes figuras para el banco 2960 a modo de ejemplo, el proceso debe repetirse para cada banco de cada fase:

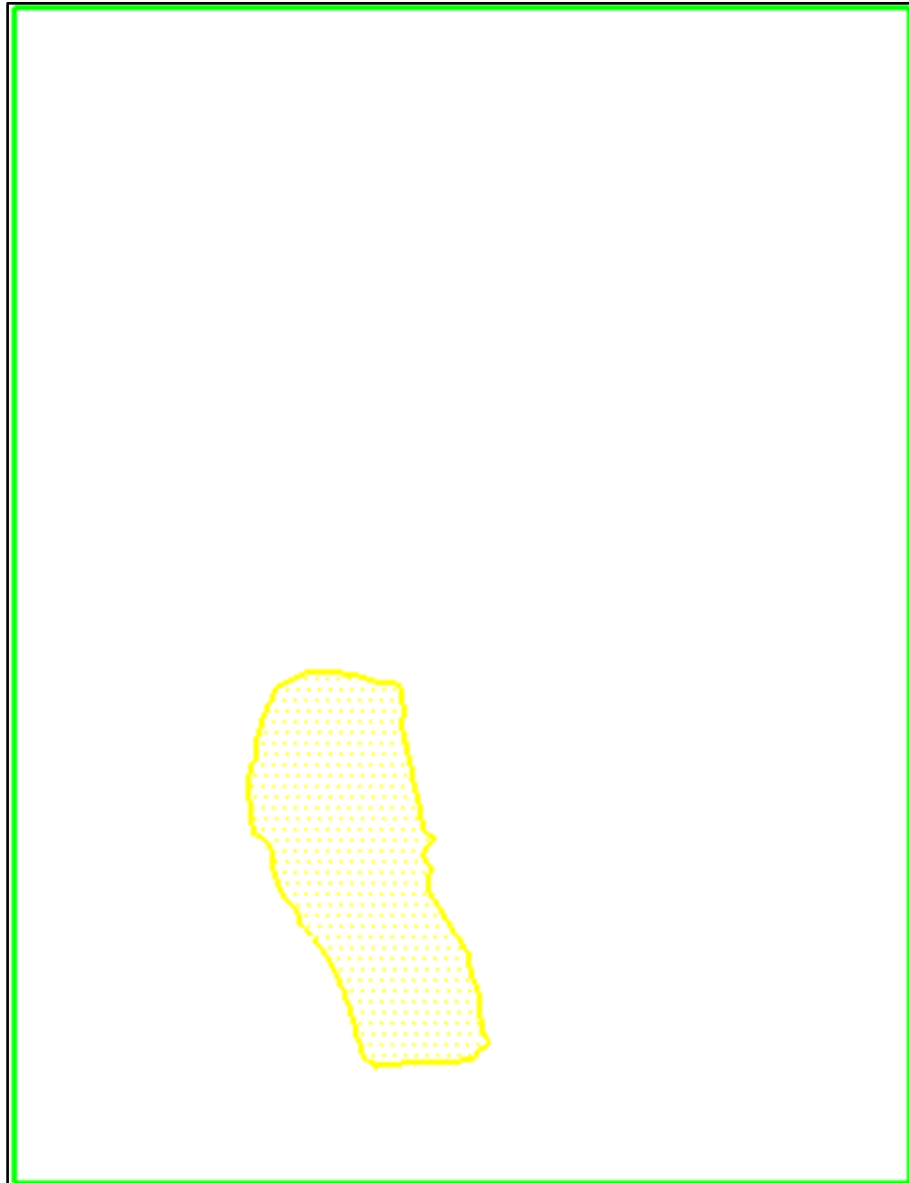


FIGURA 2.9 *Topografía inicial banco 2960. Obtenida vía Prepare Graphics Data*

En la figura 2.9 se aprecia en color amarillo el aire de la topografía inicial en el banco 2960, esta debe cargarse como curvas de nivel, y posteriormente guiar a la herramienta para seleccionar el aire perteneciente a la zona interior de la línea amarilla, de esta forma

CAPÍTULO 2 DESARROLLO DEL TEMA

la herramienta reconoce que lo exterior a la zona delimitada en color amarillo corresponde a roca.

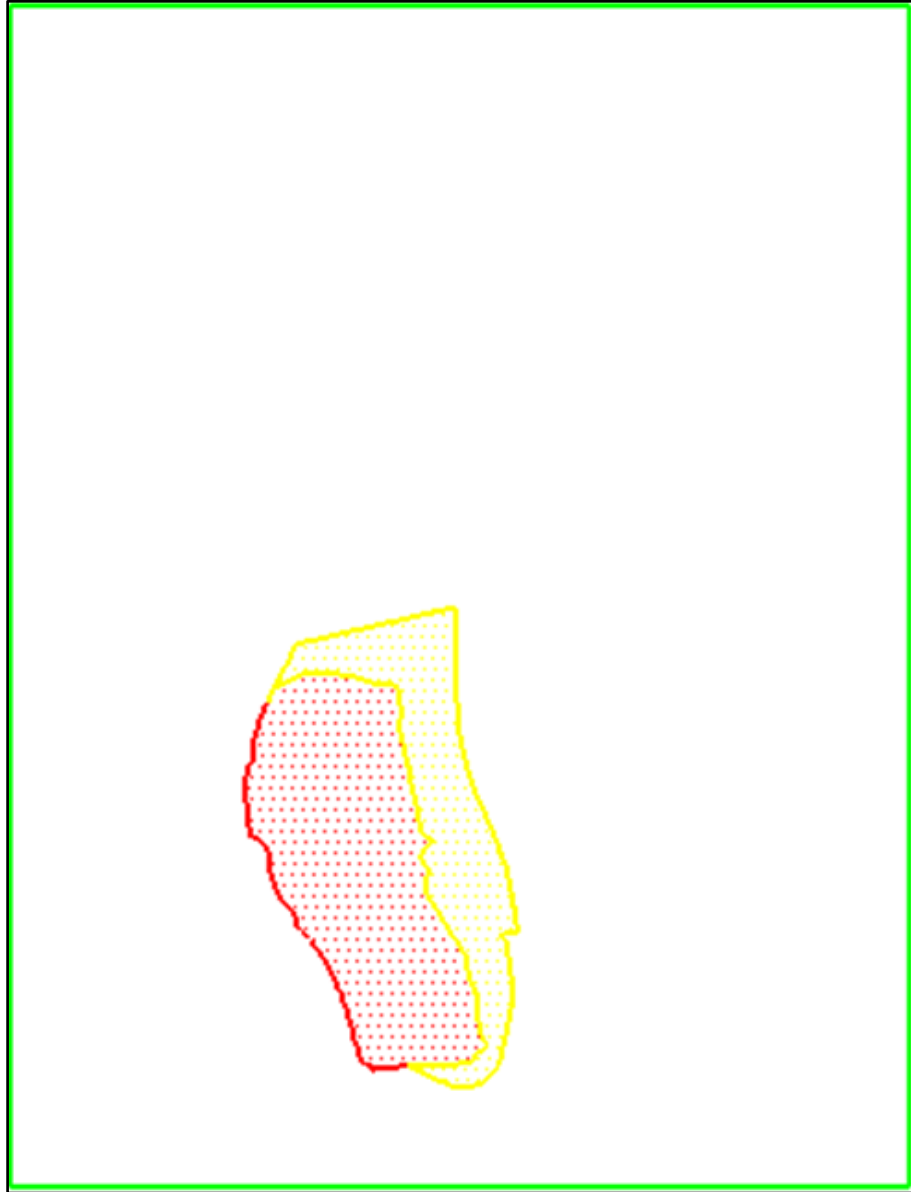


FIGURA 2.10 *Topografía inicial intersectada con fase F1 banco 2960. Obtenida vía Prepare Graphics Data*

En la figura 2.10 se aprecia en color rojo el aire de la topografía inicial del banco 2960, mientras en color amarillo se delimita la pata de la fase F1 del banco 2960, el color amarillo representa el material a ser removido por la fase F1 en el banco 2960.

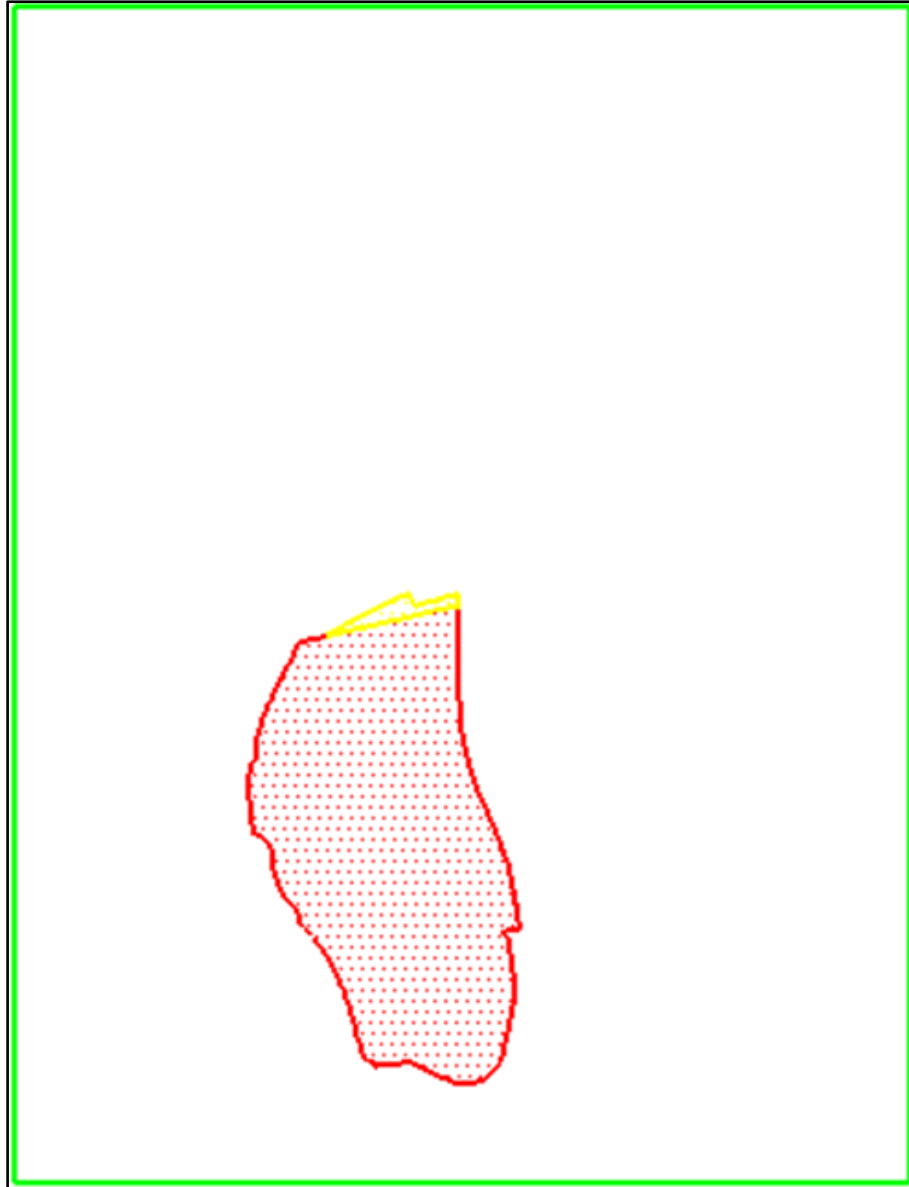


FIGURA 2.11 *Topografía post fase F1 intersectada con fase F2 banco 2960. Obtenida vía Prepare Graphics Data*

En la figura 2.11 se aprecia en color rojo el aire de la topografía post extracción de la fase F1 en el banco 2960, mientras que en color amarillo se aprecia el material a ser removido por la fase F2 en el mismo banco.

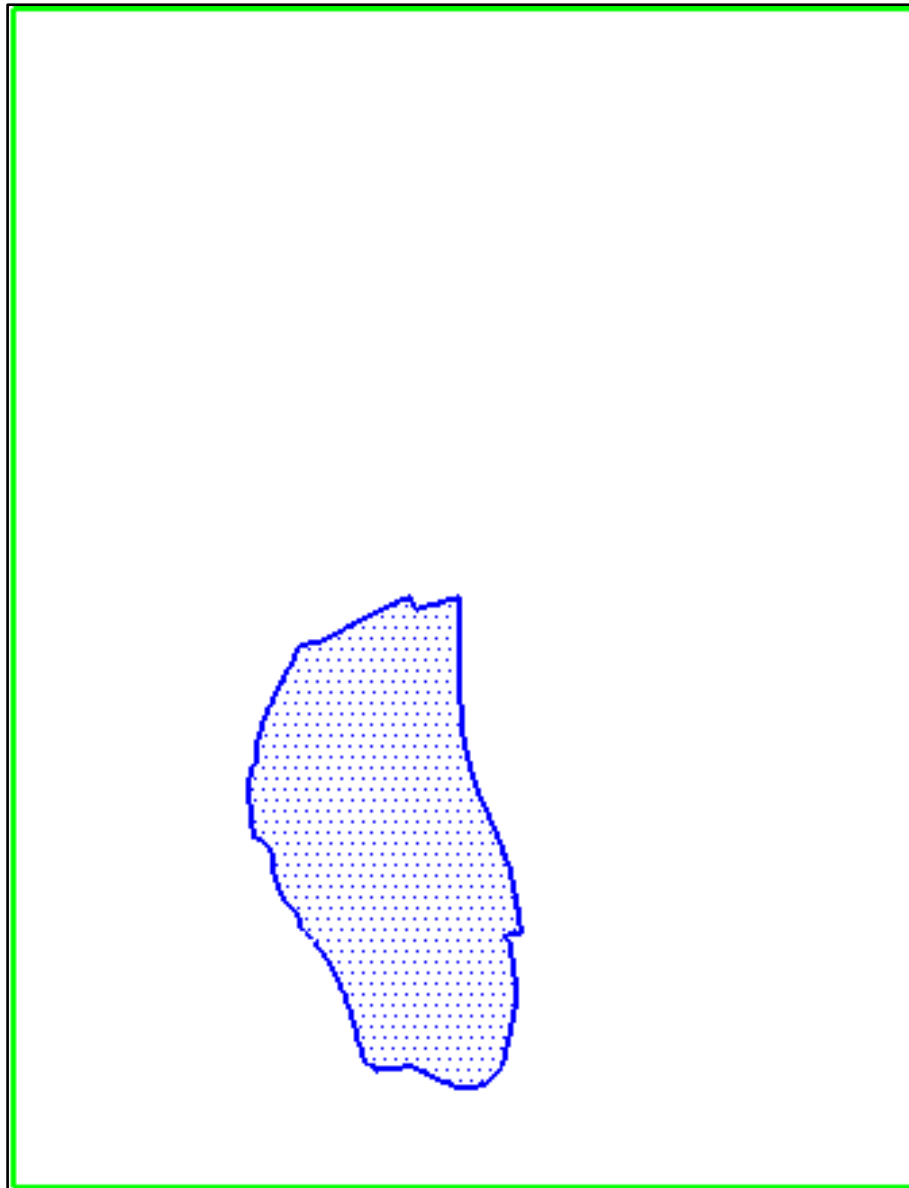


FIGURA 2.12 *Topografía final banco 2960. Obtenida vía Prepare Graphics Data*

Finalmente, en la figura 2.12 se aprecia en color azul la topografía final, tras las extracciones de la fase F1 y fase F2 en el banco 2960 de la topografía inicial, con esto la herramienta identifica gráficamente en qué sectores se desarrollan las fases y en qué orden éstas se extraen permitiendo dibujar las rutas de transporte en la pestaña *design* de MineHaul.

CAPÍTULO 2 DESARROLLO DEL TEMA

2.2.4 Agendamiento de destinos del material

La asignación de los destinos del material se realiza en la herramienta Plan Process, para ello la aplicación está diseñada siguiendo dos lineamientos principales, si el material se encuentra sobre la ley de corte crítica (en este caso 0,3% de cobre total) el material es asignado como mineral y debe destinarse a las líneas de procesamiento; mientras que si el material se encuentra bajo la ley de corte crítica es asignado como lastre y debe ser destinado a botadero.

Si el material es asignado como mineral, por poseer ley del material sobre la ley de corte crítica, es destinado según las líneas de procesamiento de la empresa minera para la cual fue diseñada la herramienta, en los cuales se priorizan: línea de concentración de mineral sulfurado mediante planta concentradora, línea de pilas de lixiviación para mineral oxidado o finalmente el mineral puede ser destinado a pilas ROM, en donde el mineral es depositado según su composición mineralógica para ser procesado mediante biolixiviación. Si todas las líneas de procesamiento se encuentran colmadas por material de mejor calidad (ley de cobre, recuperación, spi, etc.) el mineral es enviado a stockpiles, en donde es almacenado, hasta que sea requerido en una de las líneas mencionadas anteriormente.

Si el material es asignado como lastre, por poseer ley del material bajo la ley de corte crítica, es destinado a los botaderos de la empresa minera, en donde el material es depositado de forma definitiva, pues su extracción no implica beneficios económicos para la empresa.

En la figura 2.13 se aprecia la cantidad total de material removido de la mina y cuánto de este material es enviado a procesamiento y cuánto enviado a botadero para cada período del plan.

CAPÍTULO 2 DESARROLLO DEL TEMA

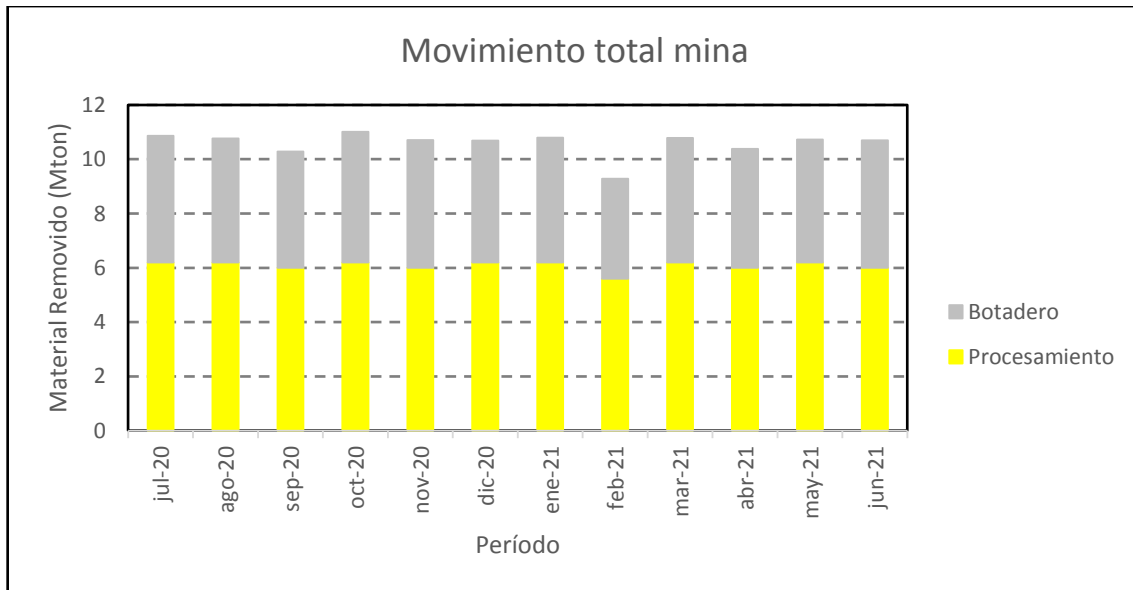


FIGURA 2.13 Distribución de material removido. Obtenido vía Plan Process

Las leyes promedios de los distintos períodos a extraer se aprecian en la tabla 2.8, además se obtiene de la herramienta Plan Process la ley de corte de planta, según los requerimientos de satisfacer las 200 ktpd de procesamiento, con el mineral de mejor ley, por lo cual el resto de mineral puede ser destinado a procesamiento de mineral de oxidado, pilas ROM o stockpiles.

TABLA 2.8 Leyes por período

Período	Ley Promedio (%)	Cutoff (%)
Julio 2020	0.63	0.52
Agosto 2020	0.63	0.52
Septiembre 2020	0.72	0.62
Octubre 2020	0.73	0.64
Noviembre 2020	0.73	0.65
Diciembre 2020	0.73	0.64
Enero 2020	0.71	0.64
Febrero 2020	0.69	0.62
Marzo 2020	0.69	0.62
Abril 2021	0.69	0.67
Mayo 2021	0.69	0.68

Junio 2021	0.71	0.69
-------------------	------	------

2.2.5 Modelo de transporte

Para modelar las rutas de transporte se utiliza la herramienta MineHaul, dicha herramienta permite cargar la topografía inicial y las medias lunas de las fases, las cuales deben ser trabajadas primeramente en Prepare Graphics Data, tras cargar la topografía y las fases se pueden diseñar las rutas de transporte de material, la herramienta designará de forma óptima la ruta de transporte disponible que minimice el tiempo de ciclo de cada período, calculando de esta forma los tiempos de ciclo promedios de cada período para remover todo el material planificado.

Para el diseño de rutas es necesario definir “Nodos”, los cuales son puntos georreferenciados que dan inicio o término a cada una de las rutas. Posteriormente, se deben diseñar las rutas de transporte para la topografía inicial y para cada una de las fases en análisis pasando banco por banco en cada fase, esto se realiza a través de creación de líneas con punto a punto entre nodos de origen y destino.

Los puntos de origen se definen como los puntos de partida del ciclo de transporte, desde donde se inicia la ruta para que el equipo de carguío cargue el material en el equipo de transporte, los puntos de destino se definen como el lugar en donde el equipo de transporte debe posicionarse para liberar su carga. El detalle de los puntos de origen y destino se detalla en la tabla 2.9 y tabla 2.10 respectivamente.

TABLA 2.9 *Coordenadas de puntos de origen*

Punto	Fase	Coordenada		
		X	Y	Z
O1	F1	59001.36	90562.69	2720.00
O2	F2	59067.48	90891.95	2960.00

CAPÍTULO 2 DESARROLLO DEL TEMA

TABLA 2.10 *Coordenadas de puntos de destino*

Punto	Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada Z
B1	57007.74	90539.65	3648.96
B2	58726.96	87730.92	2930.00
P1	58975.15	89189.6	3046.08
P2	58897.45	88977.43	3045.33

En la figura 2.14 se visualizan los nodos de origen y destinos originales, previos a la extracción de las fases, en ella los orígenes con prefijo “O” corresponden a los inicios de la fase F1 y fase F2 respectivamente. Los destinos con prefijo “B” corresponden a botaderos, mientras que los destinos con prefijo “P” corresponden a recepción de material para la planta concentradora.

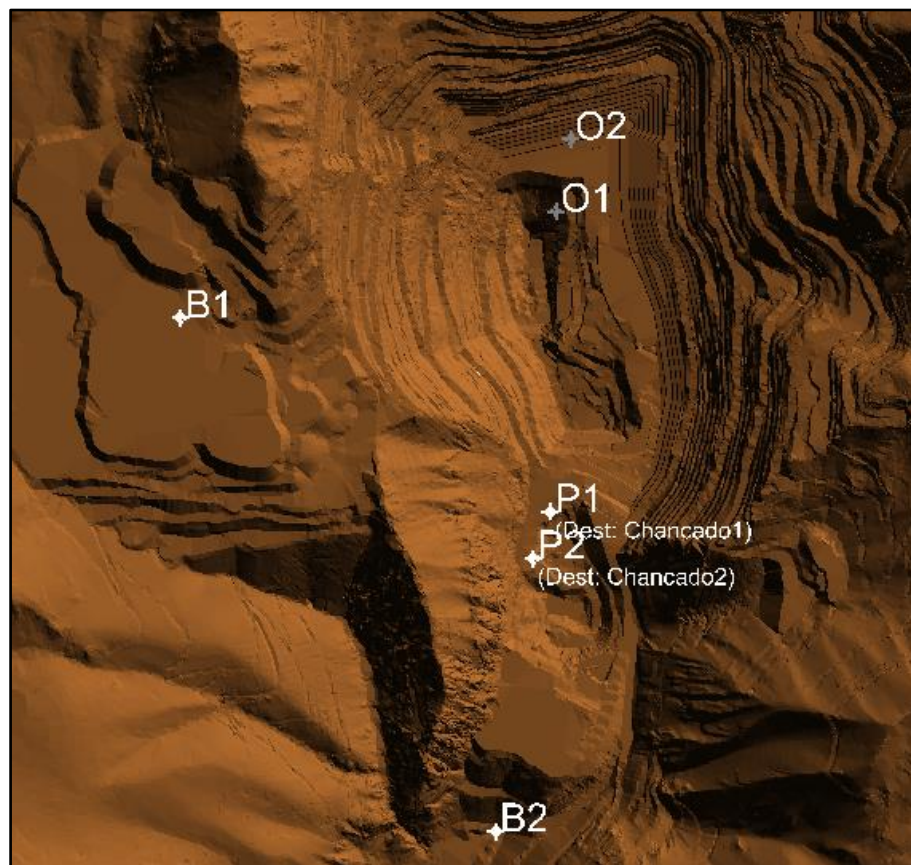


FIGURA 2.14 *Puntos de origen y destinos. Obtenida vía MineHaul*

CAPÍTULO 2 DESARROLLO DEL TEMA

Las rutas iniciales se visualizan en color blanco en la figura 2.15.

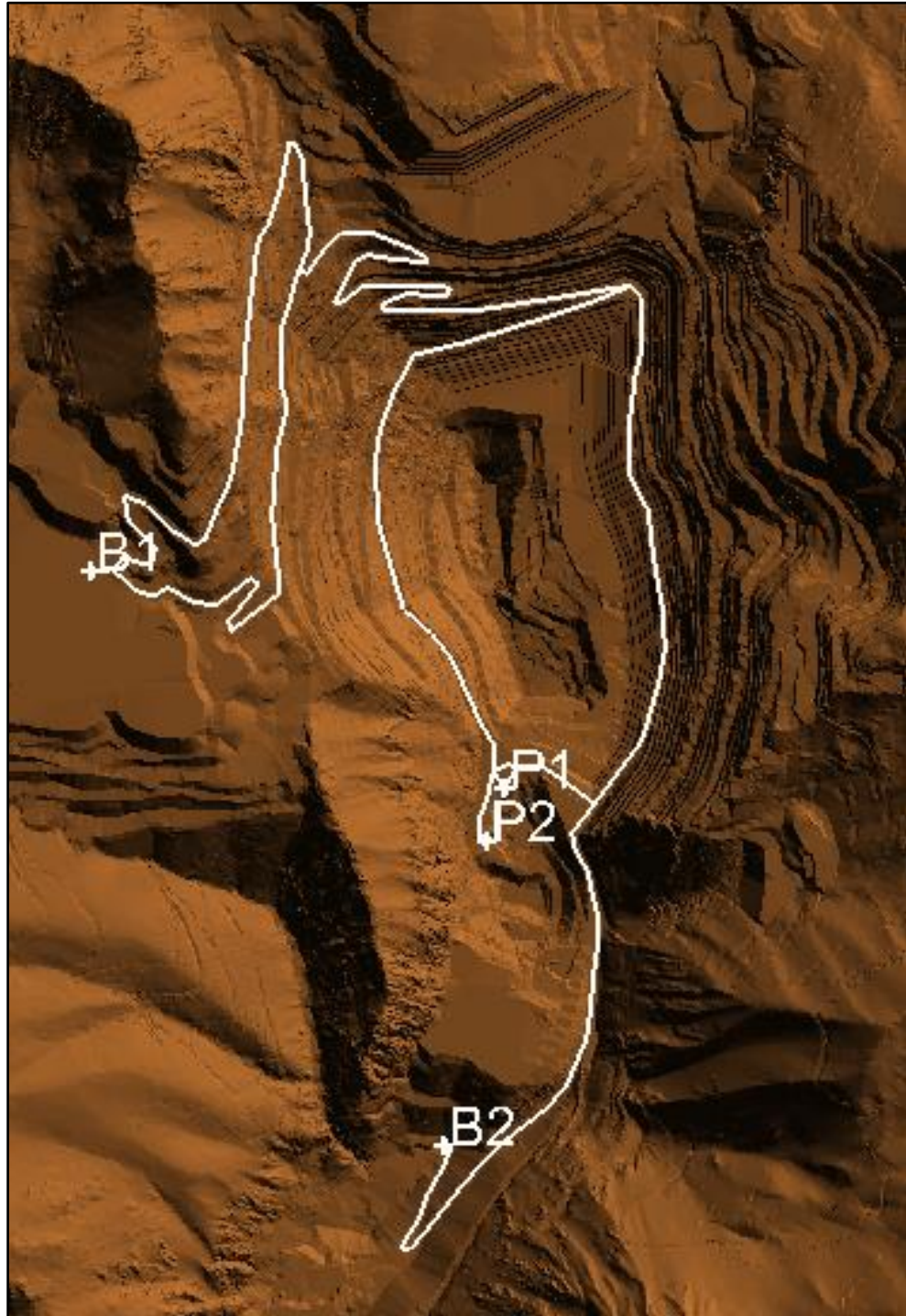


FIGURA 2.15 *Rutas de transporte iniciales. Obtenida vía MineHaul*

CAPÍTULO 2 DESARROLLO DEL TEMA

Las rutas diseñadas para la fase F1 se visualizan en color rojo en la figura 2.16, en color blanco se aprecian las rutas de transporte iniciales.

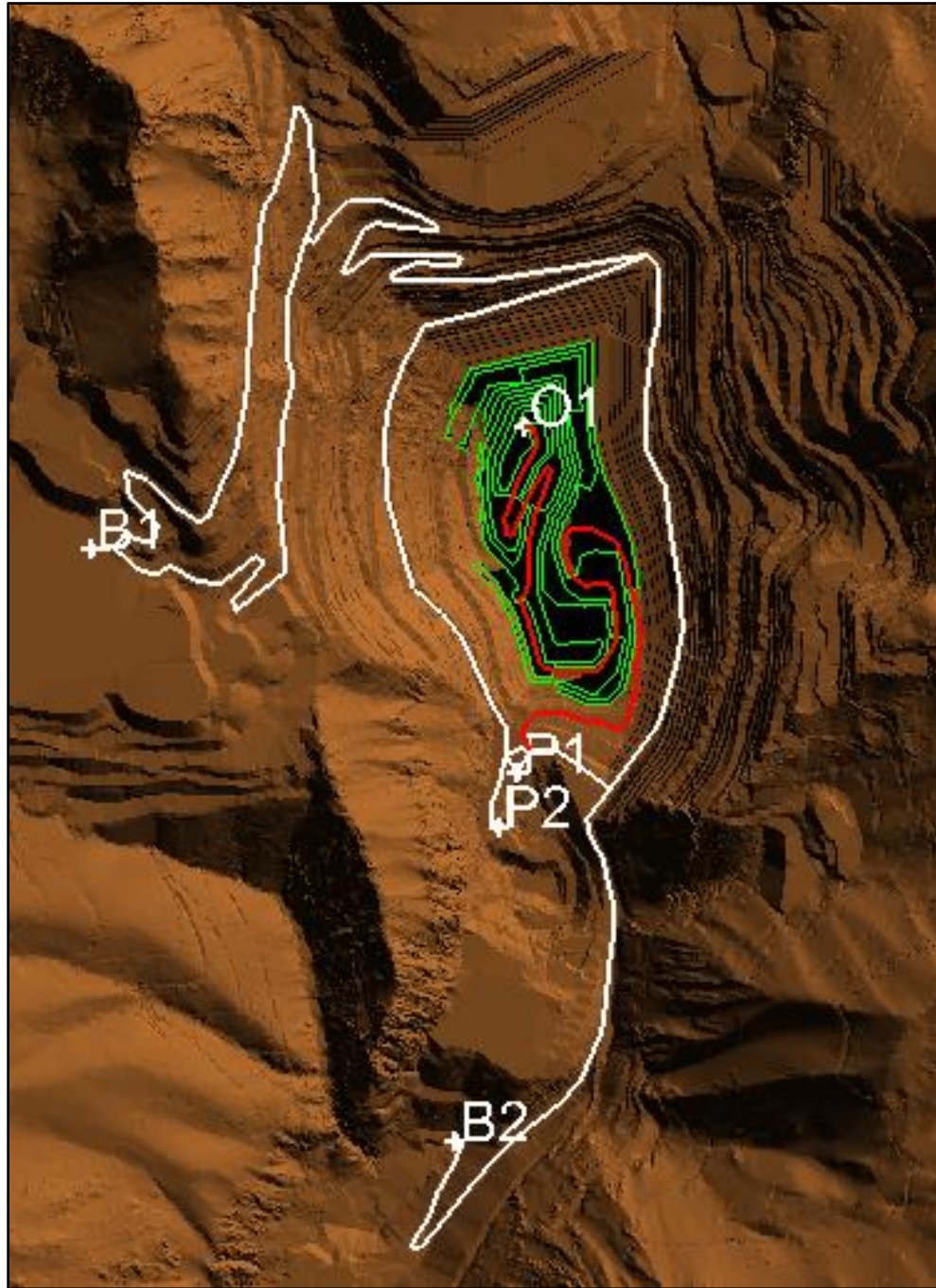


FIGURA 2.16 Rutas de transporte para fase F1. Obtenida vía MineHaul

CAPÍTULO 2 DESARROLLO DEL TEMA

Los detalles desde el punto de origen O1 hasta el empalme con las rutas de transporte iniciales se establecen en la tabla 2.11.

TABLA 2.11 Detalles de ruta de transporte para fase F1. Obtenenida vía MineHaul

Distancia total (Km)	Diferencia de elevación (m)	Distancia en plano (Km)	Distancia inclinada (Km)	Pendiente promedio (%)
4.1	329.9	0.8	3.3	10.0

En la figura 2.17 las rutas de transporte para la fase F1 se visualizan en color rojo, las rutas para la fase F2 se visualizan en color amarillo y las rutas iniciales se visualizan en color blanco. Los nodos de prefijo “E” simbolizan el empalme con la ruta de transporte inicial.

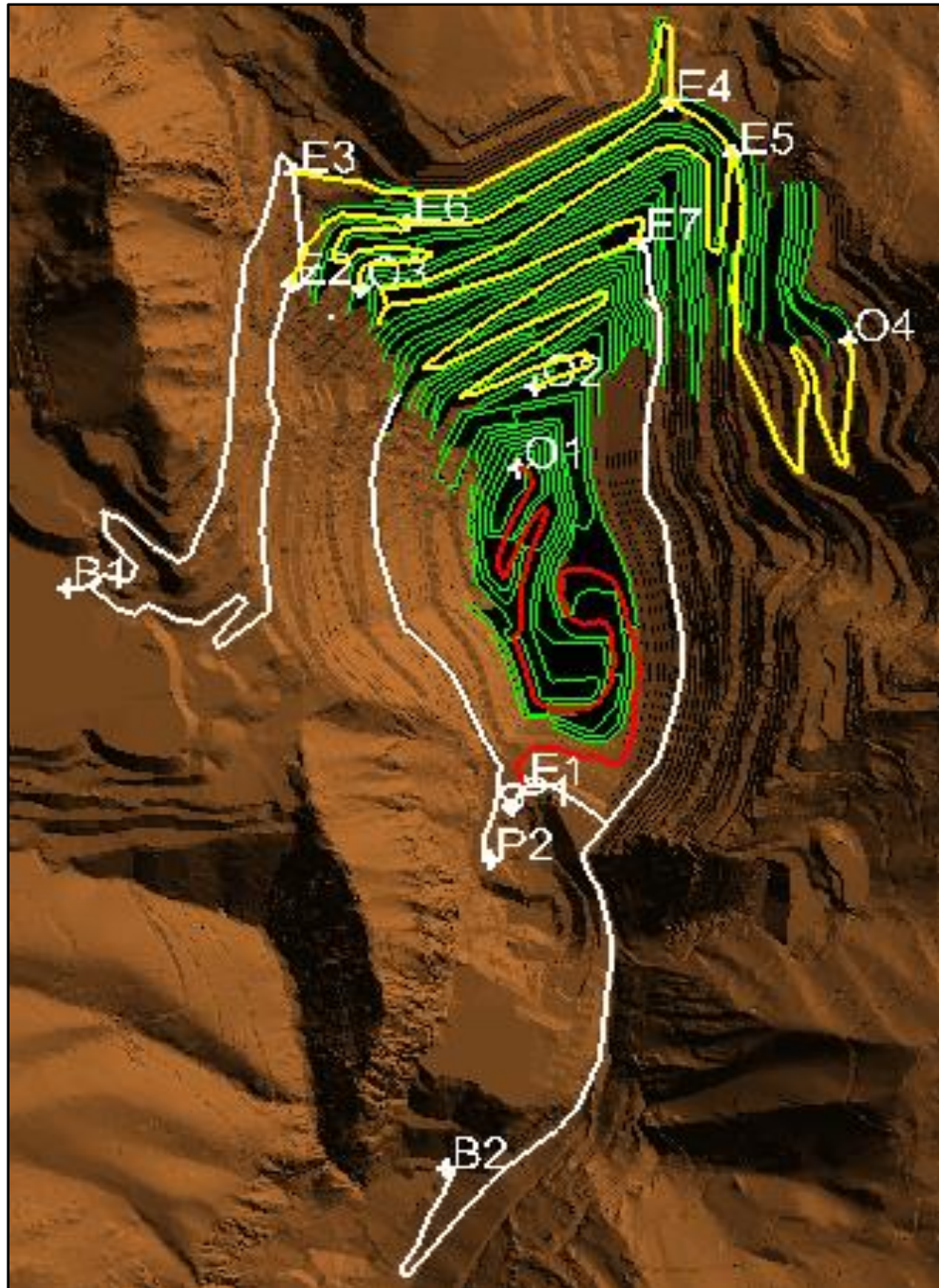


FIGURA 2.17 *Rutas de transporte para fases F1 y F2. Obtenida vía MineHaul*

Los detalles de las rutas de transporte para la fase F2 se detallan en la tabla 2.12.

CAPÍTULO 2 DESARROLLO DEL TEMA

TABLA 2.12 *Detalles de rutas de transporte para fase F2. Obtenida vía MineHaul*

Punto 1	Punto 2	Distancia total (Km)	Diferencia de elevación (m)	Distancia en plano (Km)	Distancia inclinada (Km)	Pendiente promedio (%)
O2	E7	3.3	285.0	0.3	3.0	9.6
E7	E5	3.4	285.0	0.5	2.9	9.8
O4	E5	3.0	210.0	0.7	2.3	9.4
E4	E5	0.3	30.0	0.0	0.3	9.4
E4	E6	1.2	60.0	0.6	0.6	10.4
E2	E6	0.6	37.4	0.2	0.4	9.0
E3	E4	2.1	48.5	1.1	1.0	5.0
O3	E6	1.1	90.0	0.0	1.1	8.1

Las velocidades se definen en el programa promediando las velocidades obtenidas de las curvas de tracción y de retardo de dos camiones de extracción disponibles en el mercado que cuentan con capacidad nominal superior a 350 toneladas, se determinan éstas según una pendiente de 10% y una resistencia a la rodadura de 2%, el programa realiza la descomposición vectorial de estas velocidades para determinar las velocidades a distintas pendientes.

TABLA 2.13 *Velocidades máximas de camiones de extracción*

Modelo	Caterpillar 797F		Komatsu 980E-4	
	Velocidad (km / hr)		Velocidad (km / hr)	
Condición	Cargado	Vacío	Cargado	Vacío
Subida (10% + 2%)	12	27	11	27
Plano	67.6	67.6	60.7	60.7
Bajada (10% - 2%)	20	50	33	60

Velocidades obtenidas de Catálogo Caterpillar 797F y Catálogo Komatsu 980E-4, detalles en el apéndice c

CAPÍTULO 2 DESARROLLO DEL TEMA

Promediando las velocidades de la tabla 2.13 se obtienen las velocidades que son ingresadas al programa, según González (2014) las velocidades de los equipos de transporte son limitadas por las normas internas de seguridad de las empresas mineras a 35 km/hr, en este estudio se utiliza el límite de velocidad para los tramos planos y en bajada de 35 km/hr para vehículos vacíos y 25 km/hr para vehículos cargados, obteniendo finalmente las velocidades ingresadas al programa que se detallan en la tabla 2.14.

TABLA 2.14 *Velocidades ingresadas a MineHaul*

Condición	Velocidad (km/hr)	
	Cargado	Vacío
Subida	11.5	27
Plano	25	35
Bajada	25	35

La herramienta MineHaul sólo permite ingresar un tiempo de carguío, el tiempo de descarga también es fijo, pero se puede añadir un tiempo de retraso en cada destino, para el trabajo se utilizaron tres minutos para el tiempo de carguío y dos minutos para el tiempo de descarga, sin embargo, a cada punto de descarga se le puede asignar además un tiempo de demora para ser considerados en el ciclo.

Finalmente, la herramienta MineHaul selecciona las rutas óptimas para el material a trasladar, pues establece que las rutas para el transporte sean los caminos que implican un menor tiempo en traslado en el ciclo de transporte, el perfil de transporte por período contiene las distancias ponderadas según tonelaje de las rutas a recorrer en cada período del plan, este perfil de transporte se detalla en la figura 2.18, los tiempos de ciclo promedios estimados para el plan se detallan en la figura 2.19.

CAPÍTULO 2 DESARROLLO DEL TEMA

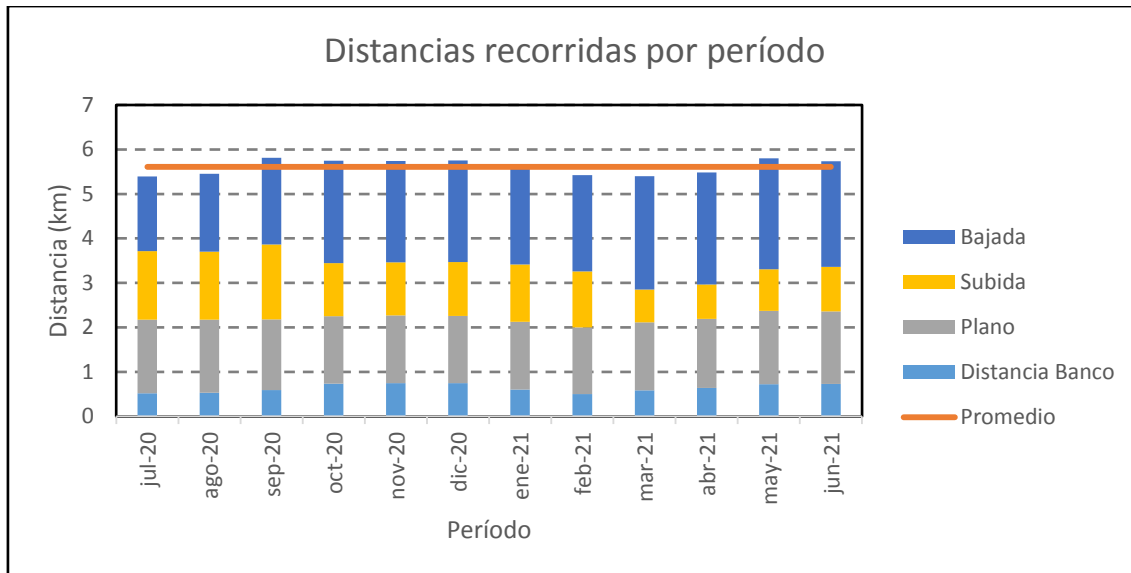


FIGURA 2.18 Perfil de transporte por período. Obtenida vía MineHaul

Se destaca que las distancias de la figura 2.18 corresponden a distancias de igual pendiente, la herramienta descompone las distancias reales según los puntos de la ruta a distancias con las pendientes que se ingresan las velocidades. Además, la herramienta asigna distancias desde la rampa de cada banco al elemento a mover, que corresponden a las distancias en bancos.

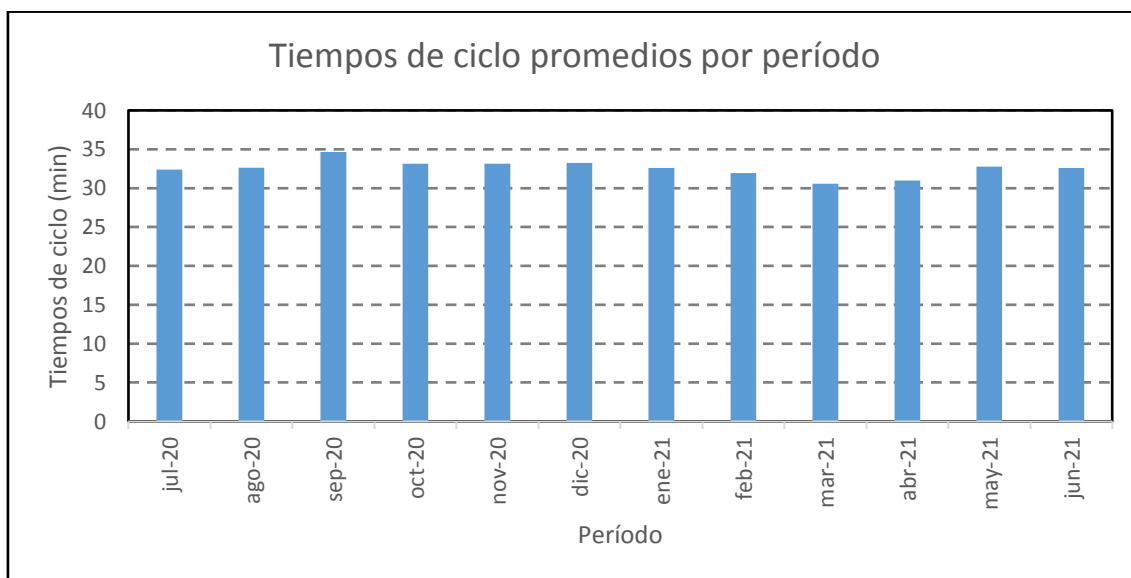


FIGURA 2.19 Tiempos de ciclo promedios por período. Obtenida vía MineHaul

2.2.6 Dimensionamiento de flota de transporte

La herramienta MineHaul calcula la cantidad de camiones necesarios en cada período para dar cumplimiento al plan desarrollado previamente en las herramientas mencionadas. De forma paralela, utilizando los tiempos de ciclo entregados por MineHaul, se emplean éstos para validar el dimensionamiento de la flota con la metodología tradicional. En la figura 2.20 se detalla la cantidad de camiones necesarios por cada período según la estimación de MineHaul y su validación utilizando los mismos tiempos de ciclo con la metodología tradicional.

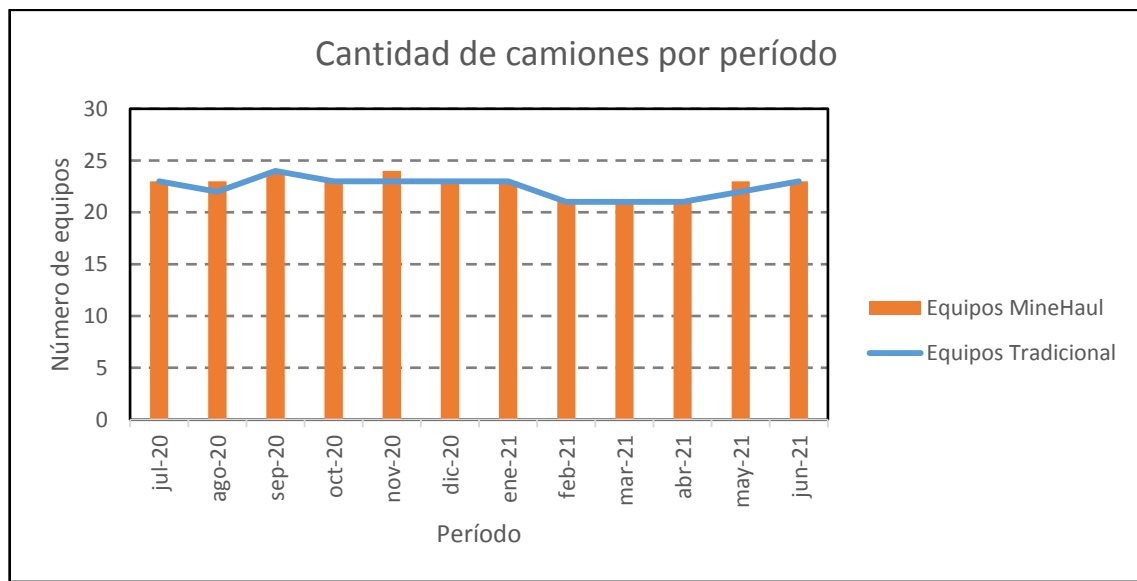


FIGURA 2.20 Cantidad de equipos por período. Obtenida vía MineHaul y metodología tradicional.

2.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El dimensionamiento llevado a cabo a través de las herramientas de Mine Planning Suite pudo ser realizado con éxito, las herramientas permiten desarrollar de forma cómoda los requerimientos de las empresas mineras, detallando producción, rutas y otras demandas que las empresas posean.

El secuenciamiento de minado se puede desarrollar de una forma dinámica y que permite a los planificadores tener flexibilidad sobre la secuencia para cumplir el plan minero, ésta puede ser verificada según los requerimientos en cada modificación de forma rápida mediante un gráfico de mineral expuesto versus remanente de estéril de cada fase, el cual es entregado por la herramienta Serrucho, similar a la figura 2.8.

La asignación de destinos se desarrolla de forma eficaz en la herramienta Plan Process, en la herramienta se agregan los requerimientos de todas las líneas de producción, permitiendo establecer línea de concentración, línea de material oxidado y línea de material para biolixiviación. La herramienta utiliza una distribución bastante sencilla del material y permite controlar las toneladas limitantes en cada línea y período.

La modelación de las rutas se desarrolla de forma exitosa en la herramienta MineHaul, la herramienta permite visualizar las pendientes y las distancias de los tramos al dibujar las rutas, esta etapa es la que presenta mayor complejidad, debido a que se debe tener un conocimiento detallado del diseño de las fases y las rampas para establecer de forma correcta las rutas, además la herramienta permite añadir un radio en el cursor al momento de dibujar, lo que facilita mantener distancias mínimas a los taludes u otras geometrías importantes.

La herramienta MineHaul determina el tiempo que tardará un equipo en recorrer cada segmento de las rutas según su pendiente, distancia y las velocidades ingresadas a los equipos, por lo tanto, al momento de tener material desde un banco de origen hasta un

CAPÍTULO 2 DESARROLLO DEL TEMA

punto de destino, ya sea planta o botadero, selecciona el conjunto de segmentos que sumen una menor cantidad de tiempo y que permitan depositar el material desde el punto de origen al destino correspondiente, de forma que el *software* determina tiempos óptimos del ciclo en cuanto a la selección de rutas con menor tiempo de transporte, repitiendo esto para cada material en cada período.

En el presente estudio el promedio de los tiempos de ciclo estimados corresponde a 32.6 minutos, con una desviación estándar de 1 minuto, lo que nos indica que los tiempos no presentan una gran variación. Estos tiempos disminuyen notoriamente en febrero de 2021 probablemente debido al término de la Fase F1 que se encontraba en una profundidad de aproximadamente 250 metros. Se destaca que de la estimación de tiempos de ciclo, aproximadamente el 85% del tiempo corresponde a tiempo de traslado de los equipos, mientras el 15% del tiempo corresponde a tiempo de carga y descarga, por lo cual, para reducir la duración de los ciclos se recomienda concentrar los esfuerzos en los tiempos de viaje de los equipos.

La herramienta MineHaul posteriormente determina el tamaño de la flota por período según los tiempos de ciclos calculados, este dimensionamiento fue contrastado con la manera tradicional utilizando los mismos tiempos de ciclo, para el período analizado, el tamaño de la flota es similar en ambas metodologías en un 75% de los períodos, el 25% restante presenta una variación de un camión extra para la estimación de MineHaul.

CAPÍTULO 3 CONCLUSIONES

El modelo determinístico que utiliza Mine Planning Suite y su conjunto de herramientas permite estimar el tamaño de la flota de transporte de forma rápida, las variaciones realizadas en sus distintas herramientas como Serrucho, Prepare Graphics Data, Plan Process y MineHaul son rápidamente conciliables a través de los reportes que cada herramienta produce, las cuales consolidan el plan minero, permitiendo flexibilidad y un rápido acomodo de éste.

El conjunto de herramientas de Mine Planning Suite destaca por su rapidez en el cálculo, permitiendo realizar modificaciones al plan minero y ver reflejadas sus consecuencias en un breve tiempo, en general, el tiempo de cálculo toma no más de 2 segundos, mientras la herramienta MineHaul, dependiendo de la cantidad de rutas y períodos toma aproximadamente 4 a 5 segundos. Otra característica positiva de las herramientas es la facilidad que presentan para generar reportes en planillas que son compatibles con Microsoft Excel y que permiten analizar en mayor detalle cada uno de los requerimientos de las empresas.

La importancia de una precisa estimación de tiempos de ciclo queda demostrada al repercutir estos tiempos en la cantidad de camiones que se deben utilizar para cumplir los objetivos del período, es más, áreas de planificación de corto plazo tienen estos tiempos como punto de partida para distribuir sus recursos en el corto plazo, por lo cual, la herramienta MineHaul toma una gran importancia al seleccionar las rutas con tiempos mínimos para la operación en cada período. De forma paralela, al entregar el *software* un resultado detallado de las distancias que se recorren en cada período las áreas de planificación pueden identificar en que rutas y en que segmentos los camiones están aumentando los tiempos del ciclo, para poder buscar una ruta alternativa en caso de ser necesaria una disminución en el tiempo de transporte.

CAPÍTULO 4 BIBLIOGRAFÍA

- Carvajal, D. I. (2015). Evaluación de metodologías de estimación de tiempos de ciclo en minera escondida. *Memoria para optar al título de ingeniero civil de minas (Memoria de pregrado)*. Santiago: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas Y Matemáticas, Departamento de Ingeniería de Minas.
- Chaowasakoo, P., Seppälä, H., Koivo, H., & Quan, Z. (2016). Improving fleet management in mines: The benefit of heterogeneous match factor. *European journal of operational research*, 1.
- Doig, P., & Kizil, M. (2013). *Improvements in truck requirement estimations using detailed haulage analysis*. Wollongong, Australia: 13th Coal Operators' Conference, University of Wollongong, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy & Mine Managers association of Australia.
- Douglas, J. (1964). Prediction of shovel-truck production: A reconciliation of computer and estimates. *Technical report n° 37, Stanford University, California*.
- González, P., Diaz, M., & Folgueras, M. (2014). Eficiencia en el transporte en minería a cielo abierto. Aplicación a una cantera de caliza. Oviedo, España: Universidad de Oviedo, EP de Ingeniería de Gijón, ETS de ingenieros de Minas de Oviedo.
- Marambio, G. (2010). Efecto del diseño minero en la velocidad de los equipos de transporte. *Memoria para optar al título de ingeniero civil de minas (Memoria de pregrado)*. Santiago, Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas Y Matemáticas, Departamento de Ingeniería de Minas.
- Morgan, W. C., & Peterson, L. L. (1968). *Determining shovel-truck productivity*. Mining Engineering.
- Muñoz, G. L. (2012). Modelo de costos para la valorización de planes mineros. *Memoria para optar al título de ingeniero civil de minas (Memoria de pregrado)*. Santiago: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas Y Matemáticas, Departamento de Ingeniería de Minas.
- Ortiz, F., Moyano, I., Herrera, J., & Plá de la Rosa, F. (2001). *Curso de evaluación y planificación minera*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas.
- Ortiz, J. (2004). *MI57E – Explotación de minas – Clase 3*. Santiago: Universidad de Chile.

CAPÍTULO 4 BIBLIOGRAFÍA

Peirano, F. A. (2011). Definición de pit final capacitado bajo incertidumbre. *Memoria para optar al título de ingeniero civil de minas (Memoria de pregrado)*. Santiago: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas Y Matemáticas, Departamento de Ingeniería de Minas.

Reátegui, C. O. (2014). *Carga y transporte en minería superficial*.

Villota, E. C. (s.f.). *Planeamiento del capital y presupuesto*. Lima: Facultad de Ingeniería Mecánica - UNI.

CAPÍTULO 5 APÉNDICES

5.1 APÉNDICE A

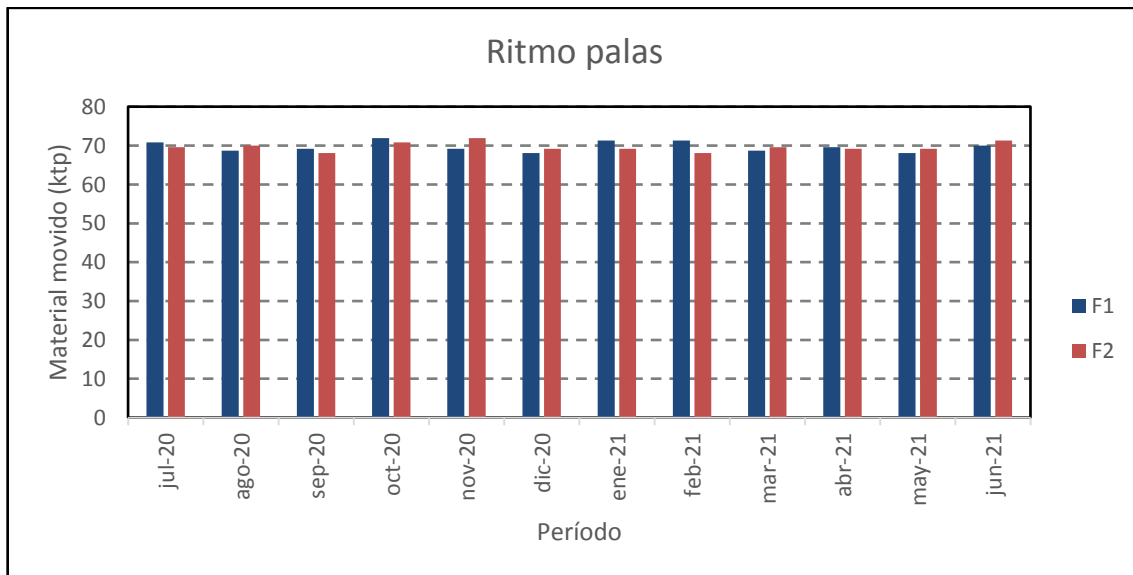


FIGURA A.1 Ritmo de producción de palas según fase

5.2 APÉNDICE B

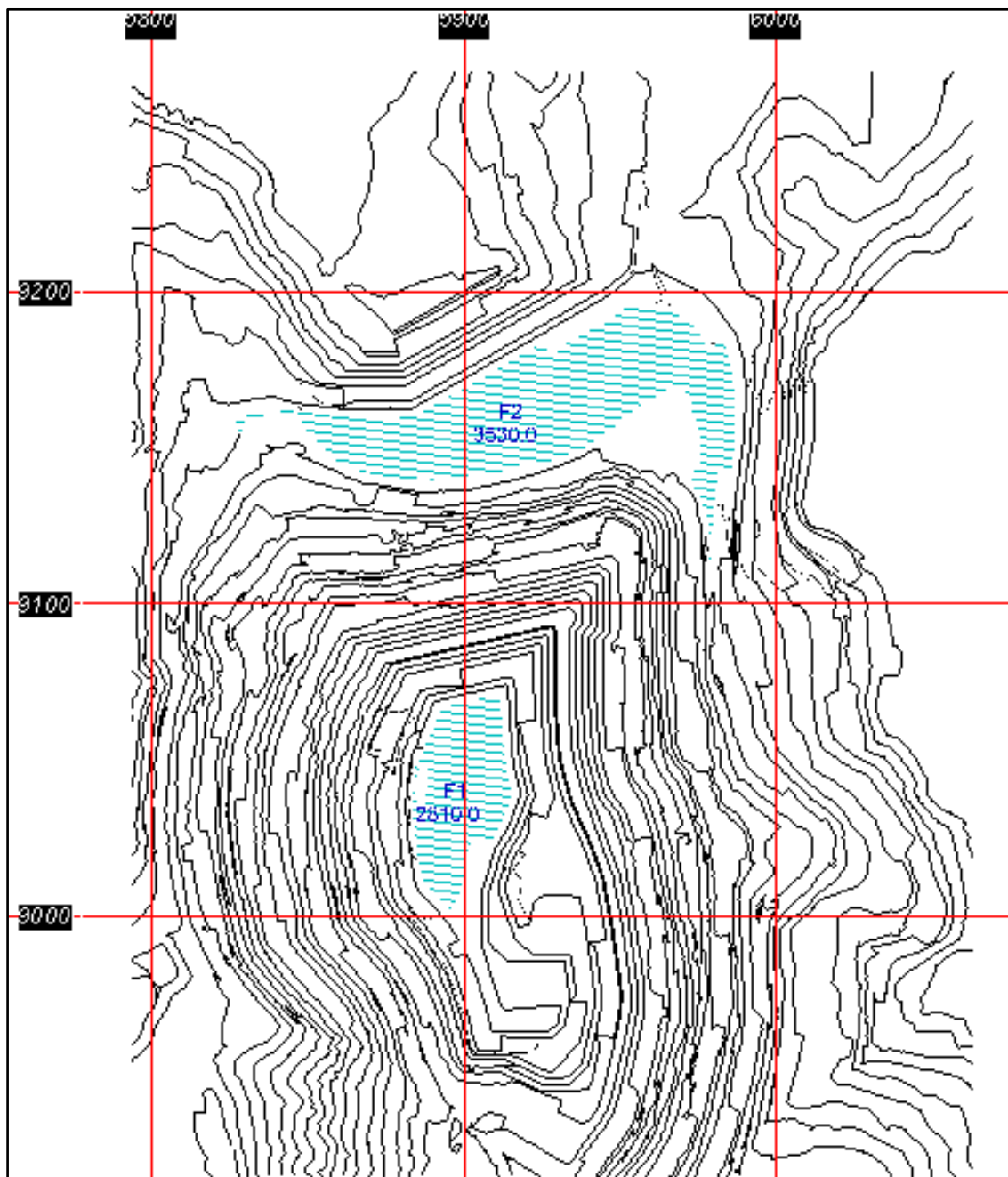


FIGURA B.1 Bancos extraídos en periodo Julio 2020

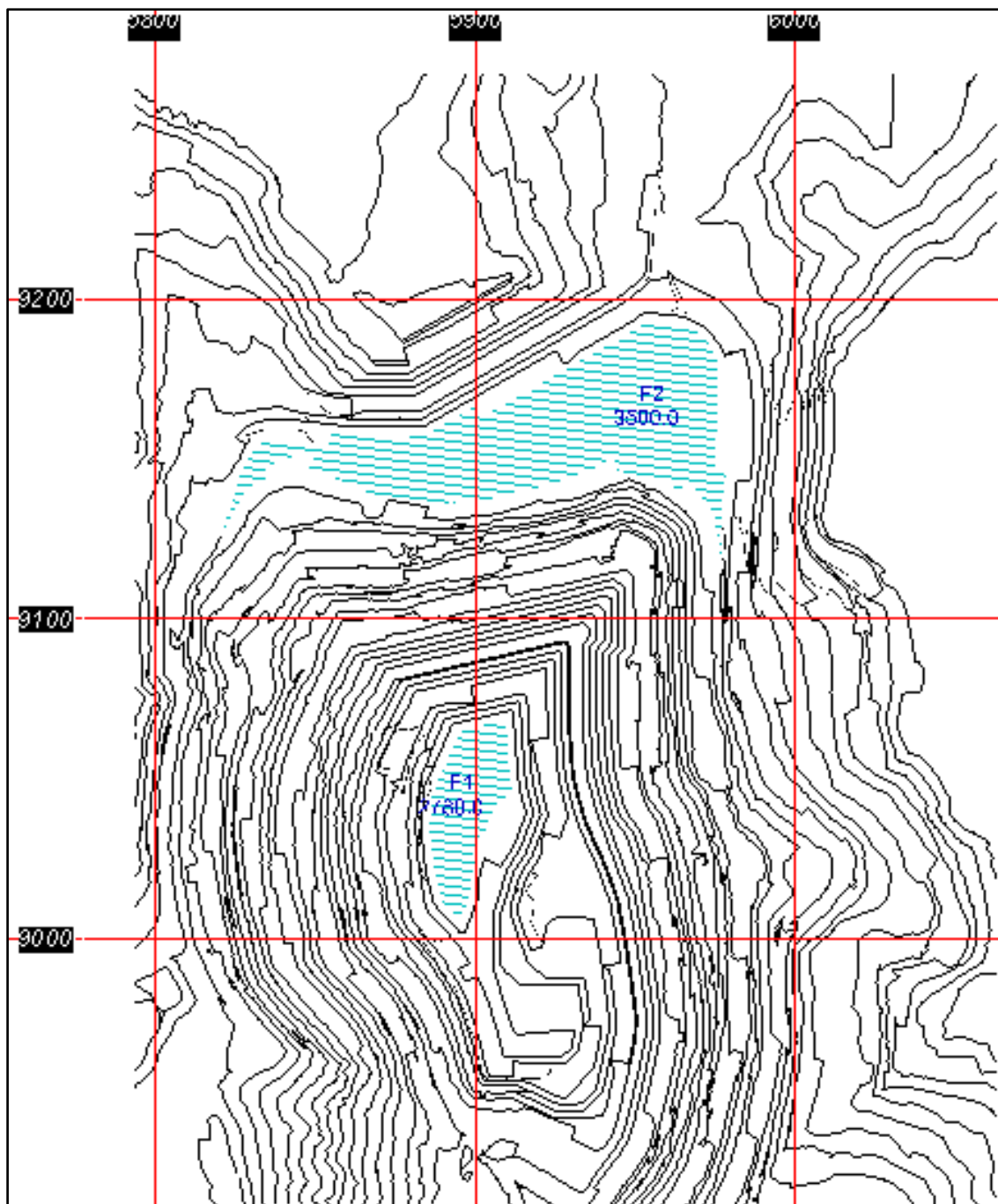


FIGURA B.2 Bancos extraídos en periodo Agosto 2020

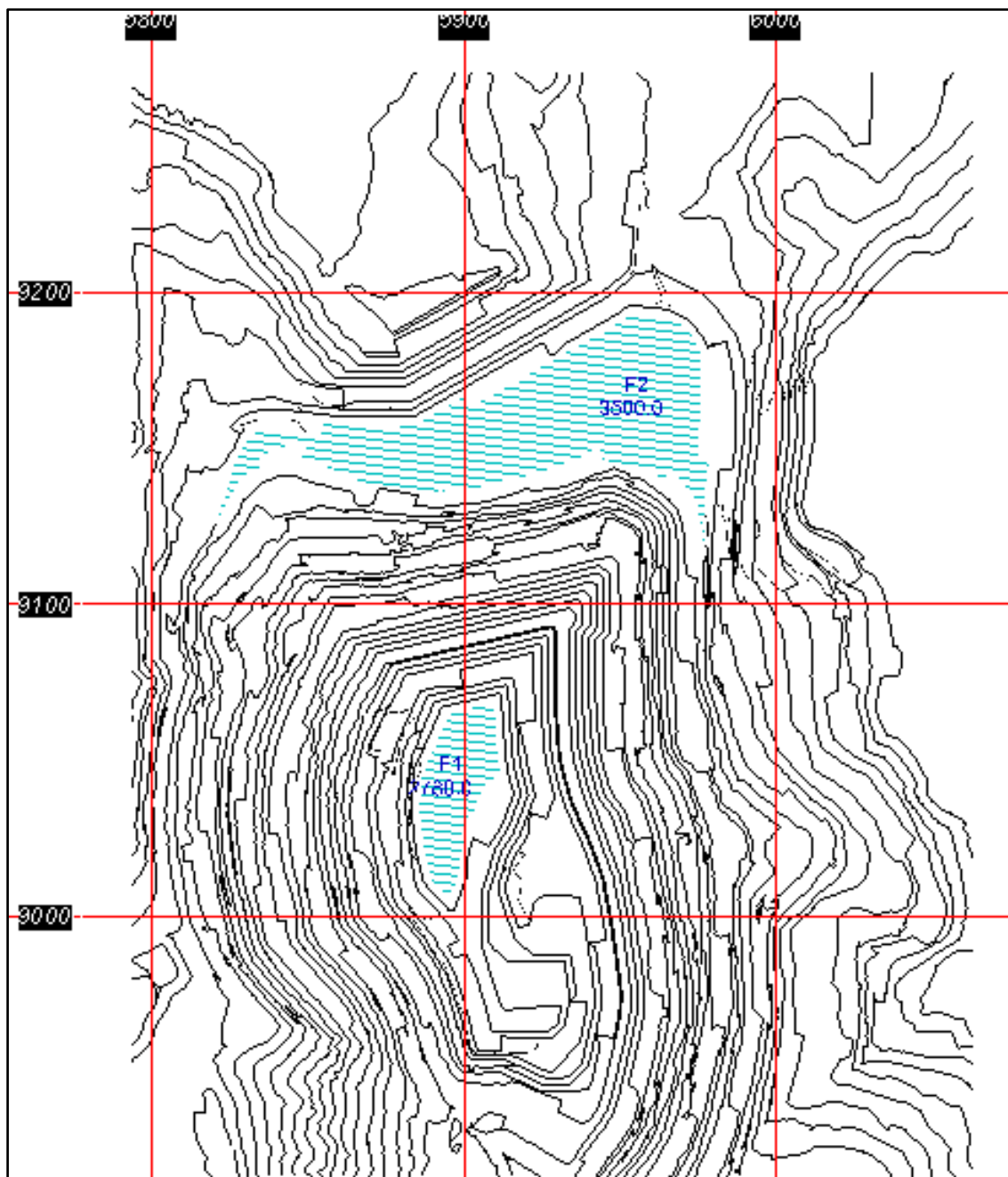


FIGURA B.3 Bancos extraídos en periodo Septiembre 2020

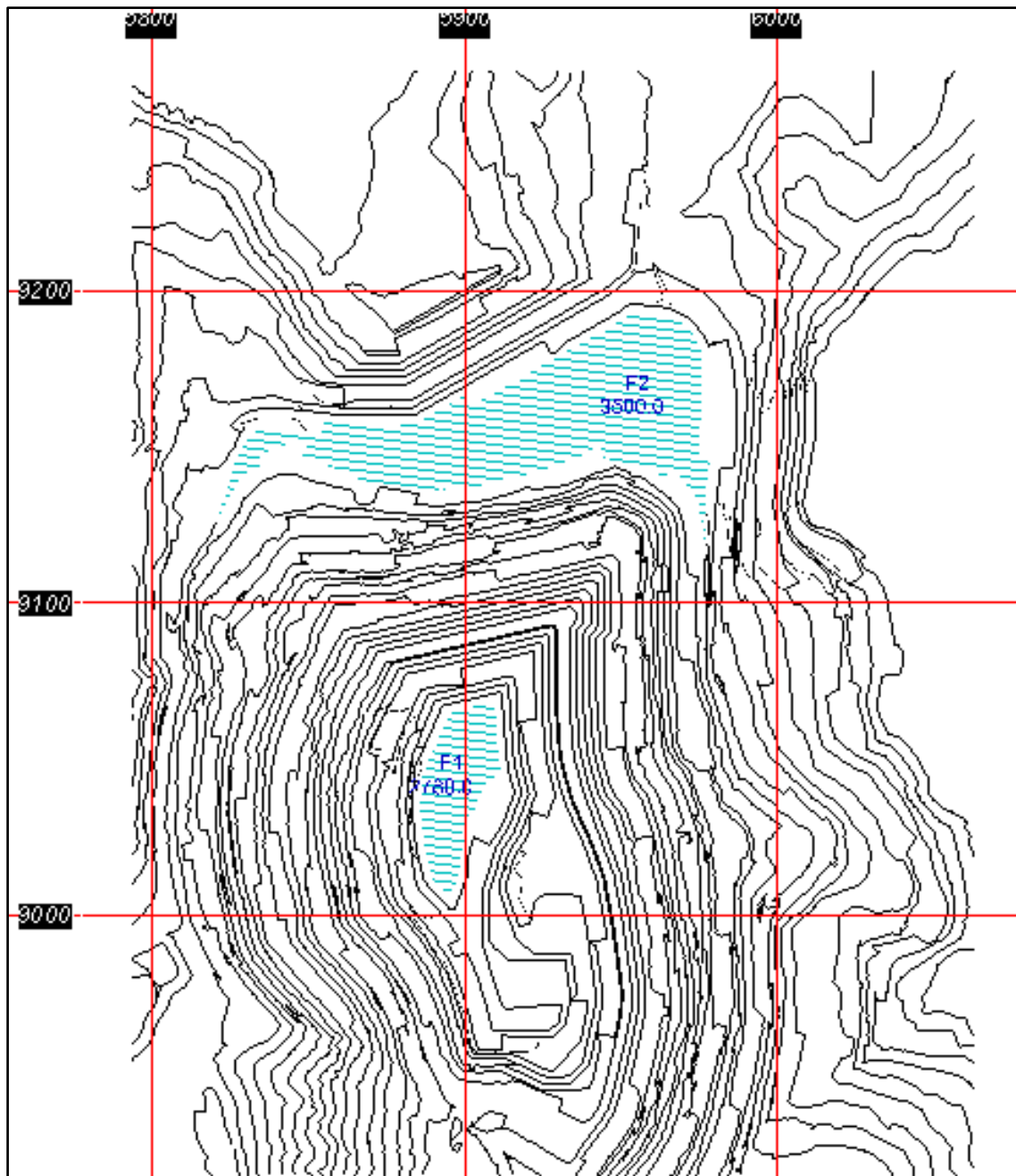


FIGURA B.4 Bancos extraídos en periodo Octubre 2020

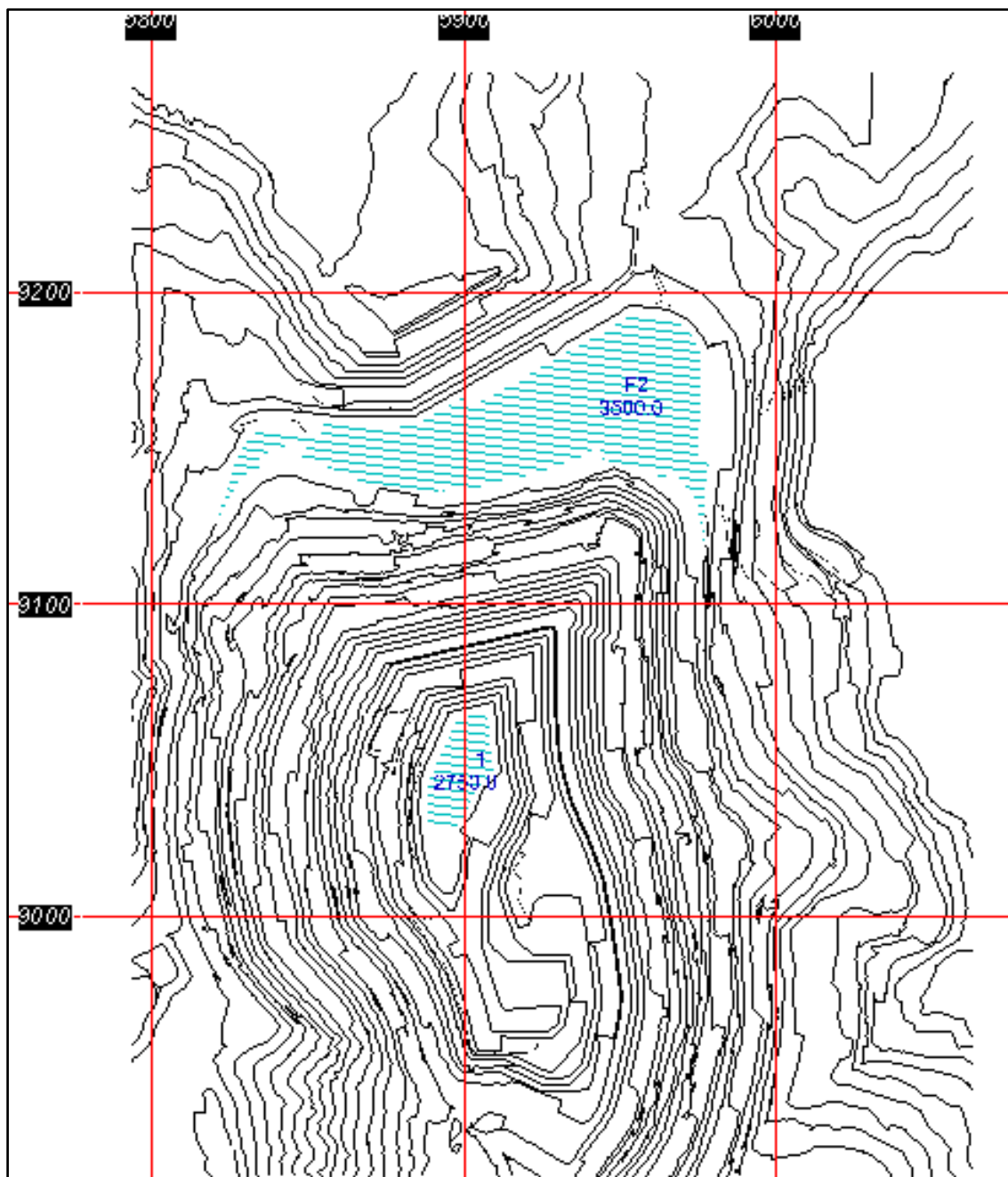


FIGURA B.5 Bancos extraídos en periodo Noviembre 2020

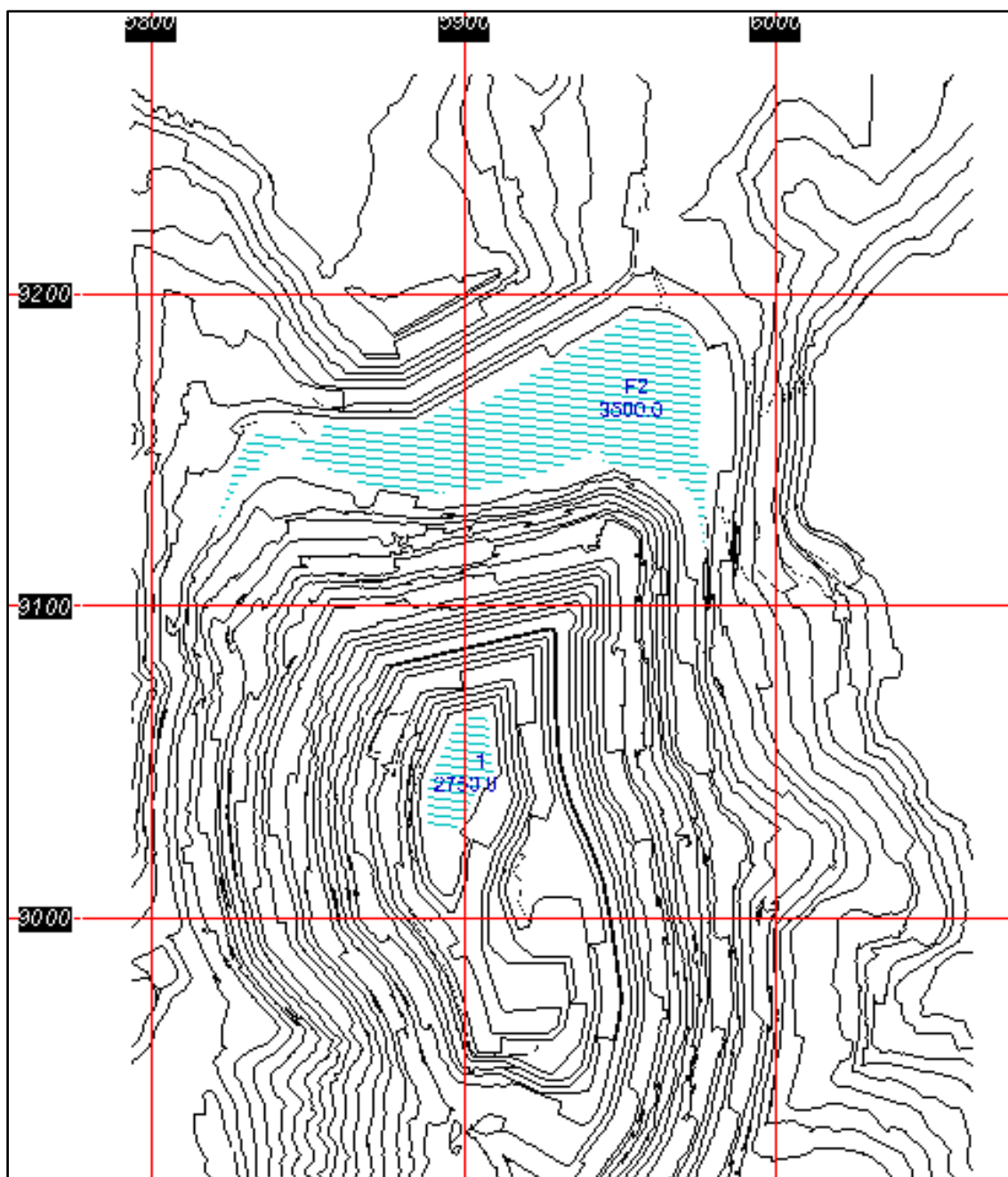


FIGURA B.6 Bancos extraídos en periodo Diciembre 2020

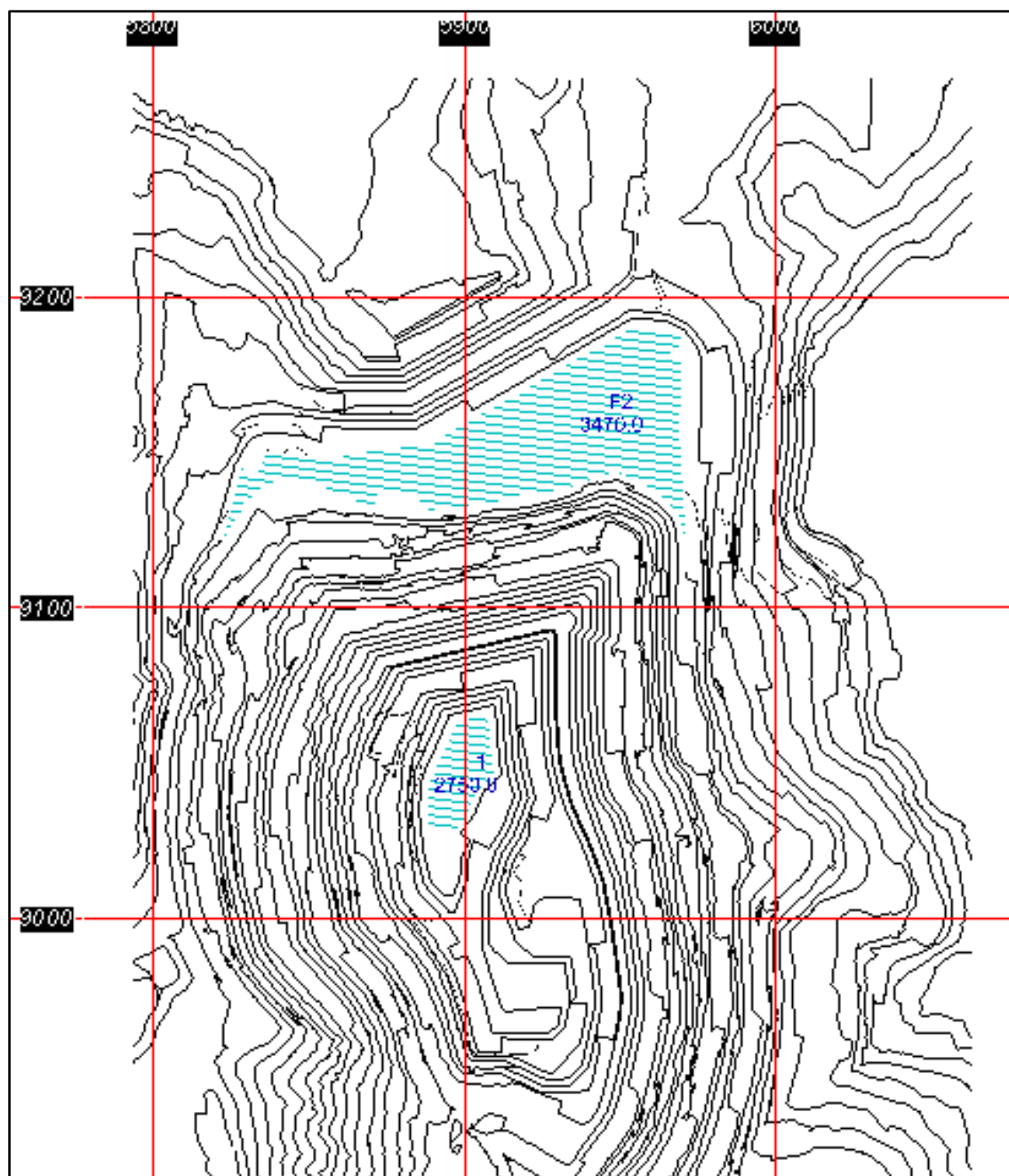


FIGURA B.7 Bancos extraídos en periodo Enero 2021

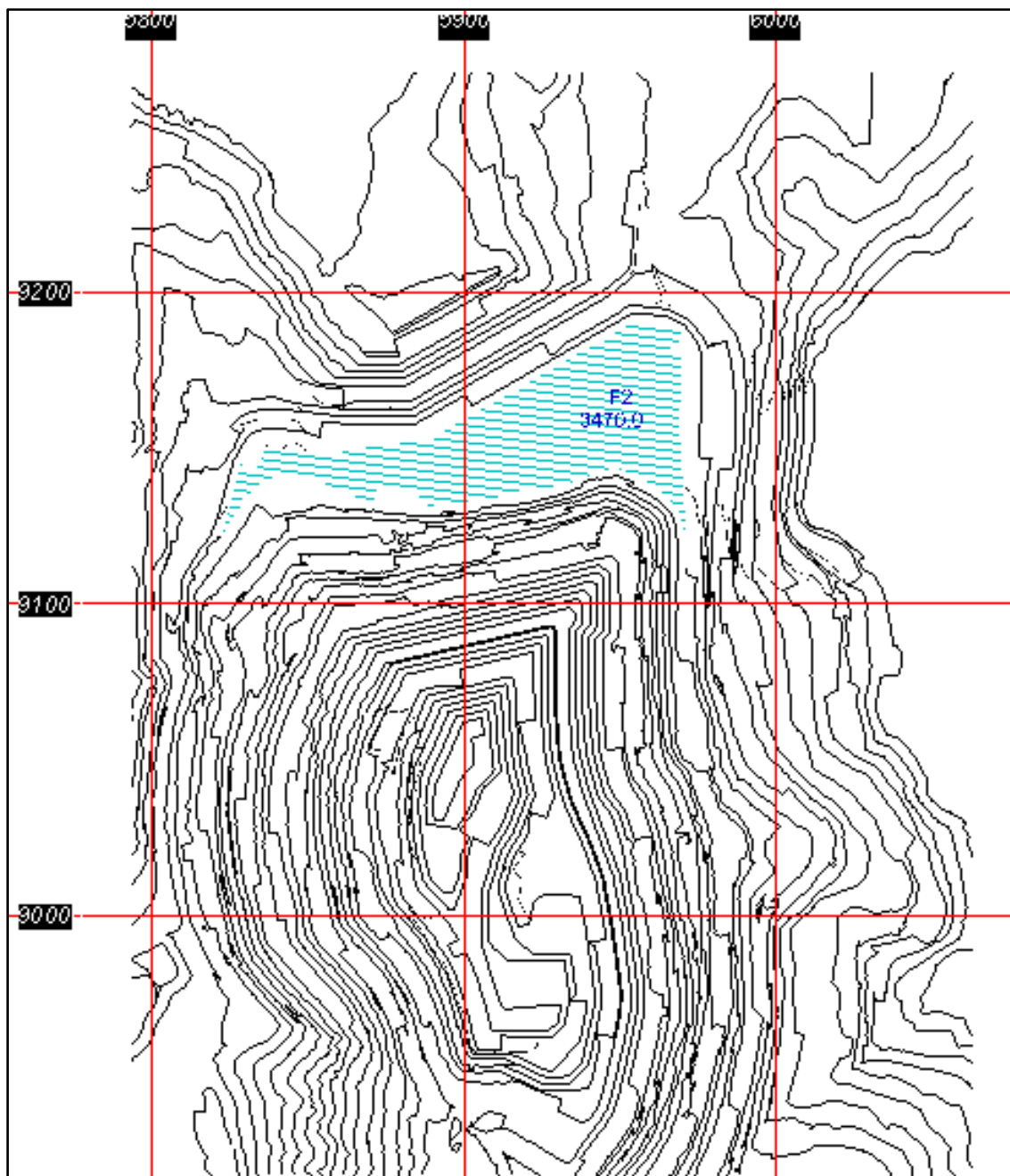


FIGURA B.8 Bancos extraídos en periodo Febrero 2021

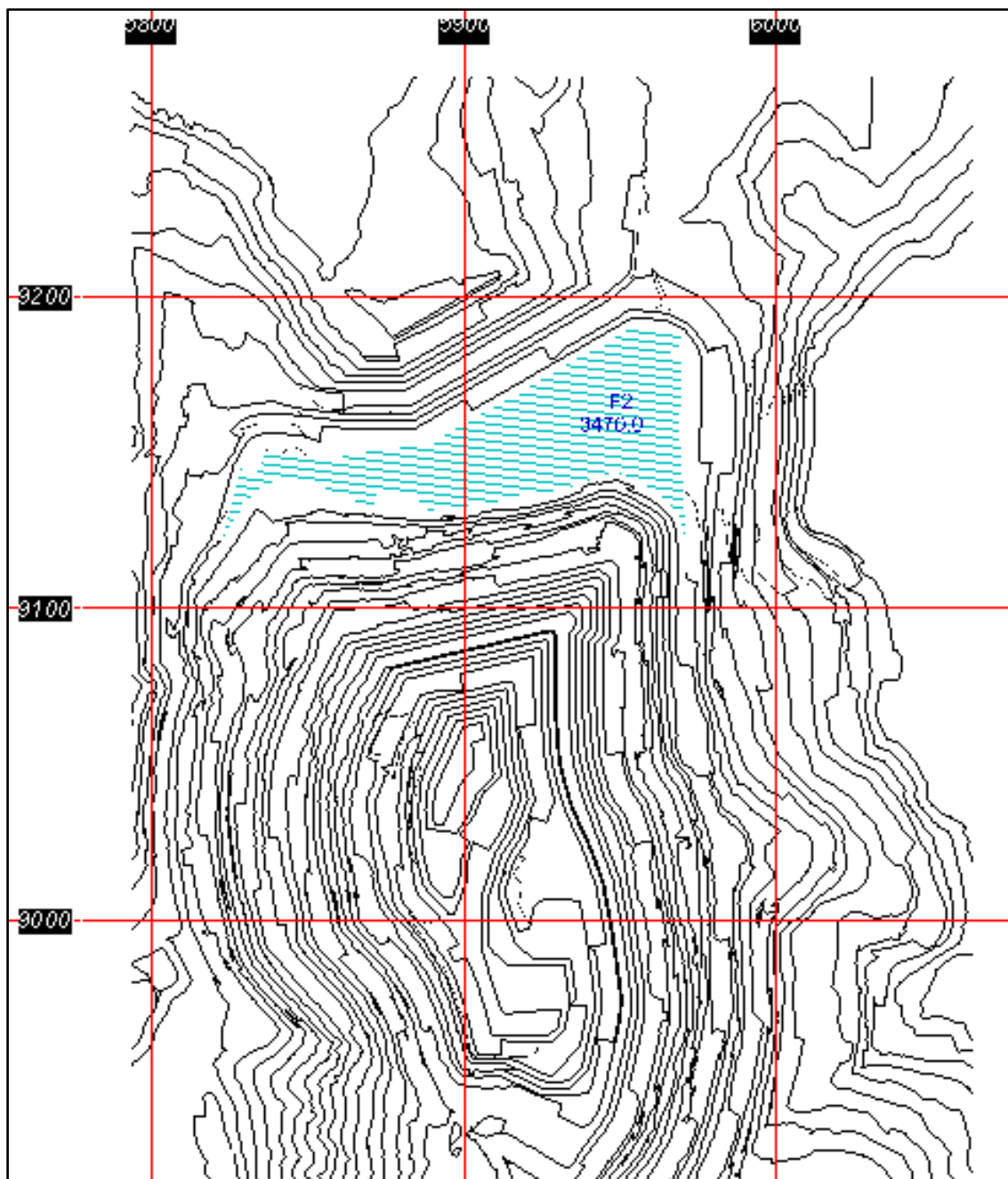


FIGURA B.9 Bancos extraídos en periodo Marzo 2021

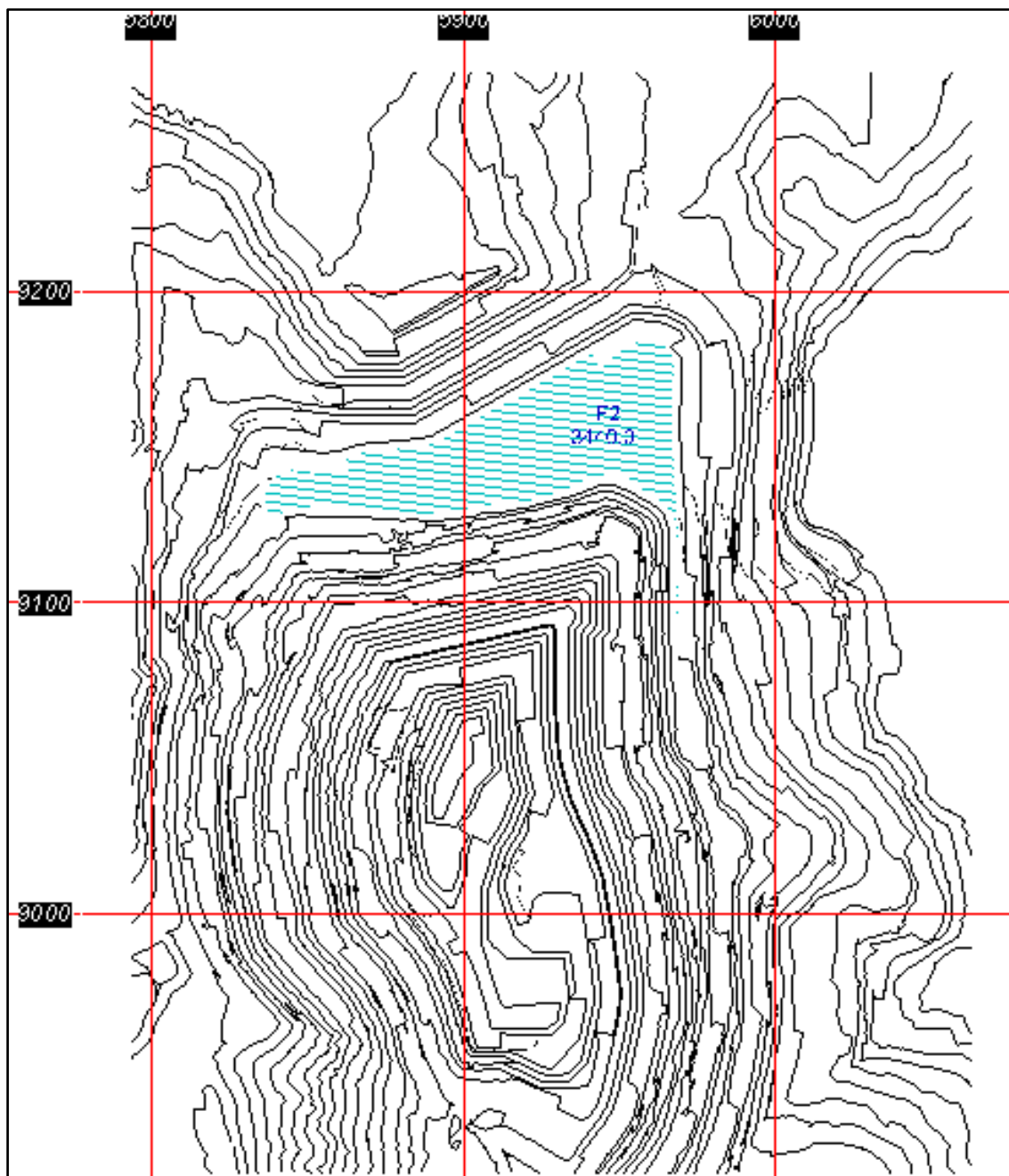


FIGURA B.10 Bancos extraídos en periodo Abril 2021

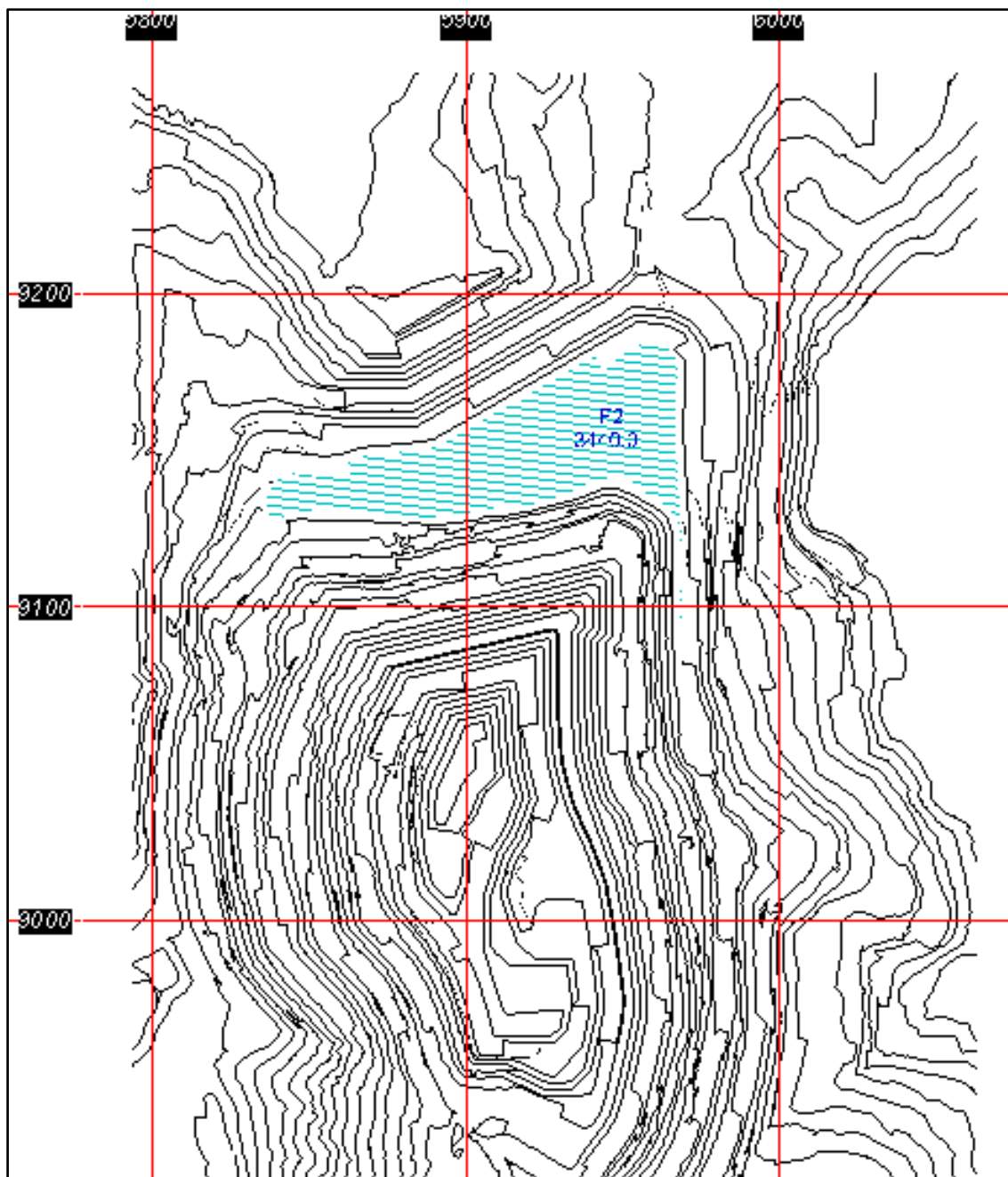


FIGURA B.11 Bancos extraídos en periodo Mayo 2021

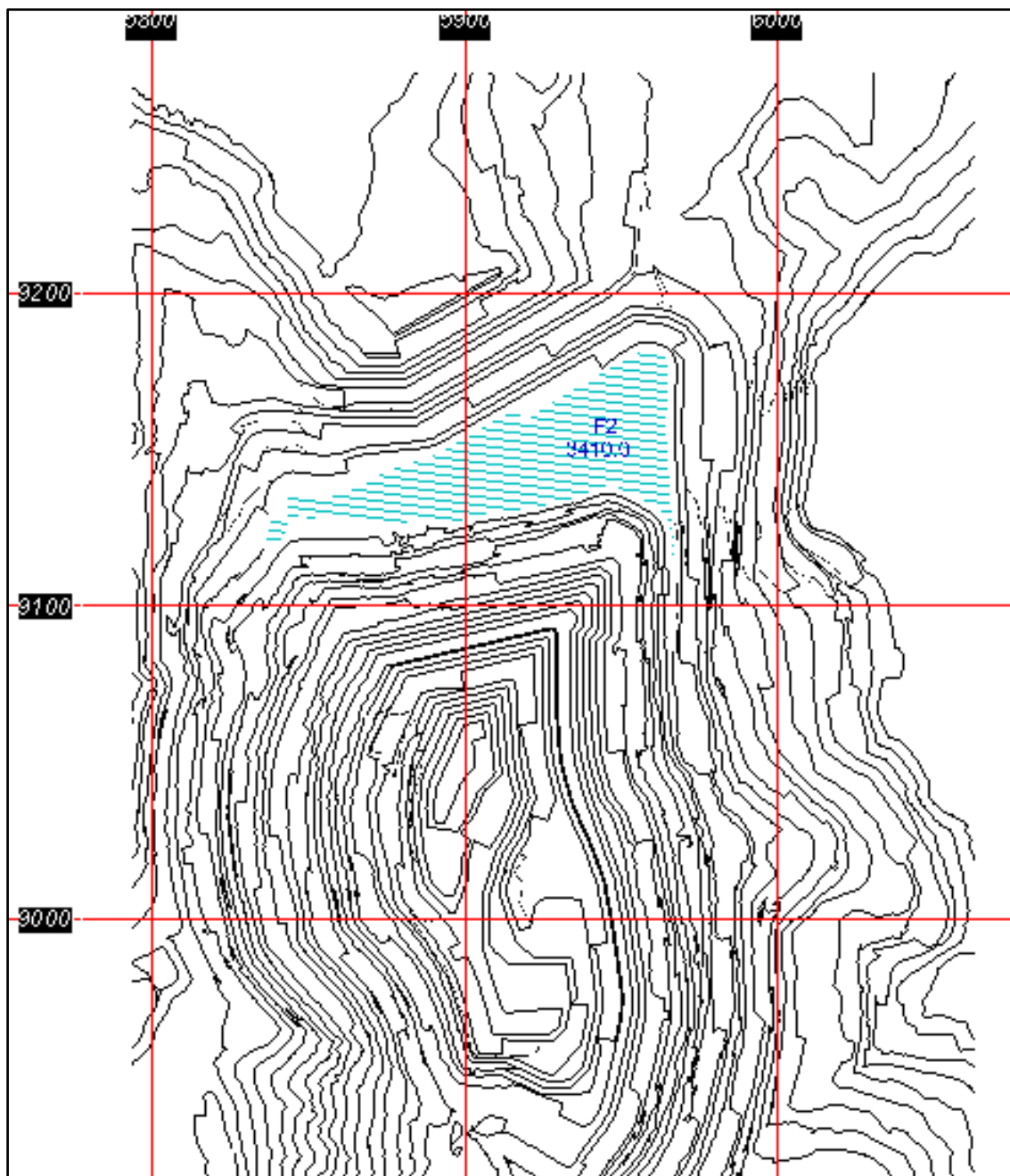


FIGURA B.12 Bancos extraídos en periodo Junio 2021

5.3 APÉNDICE C

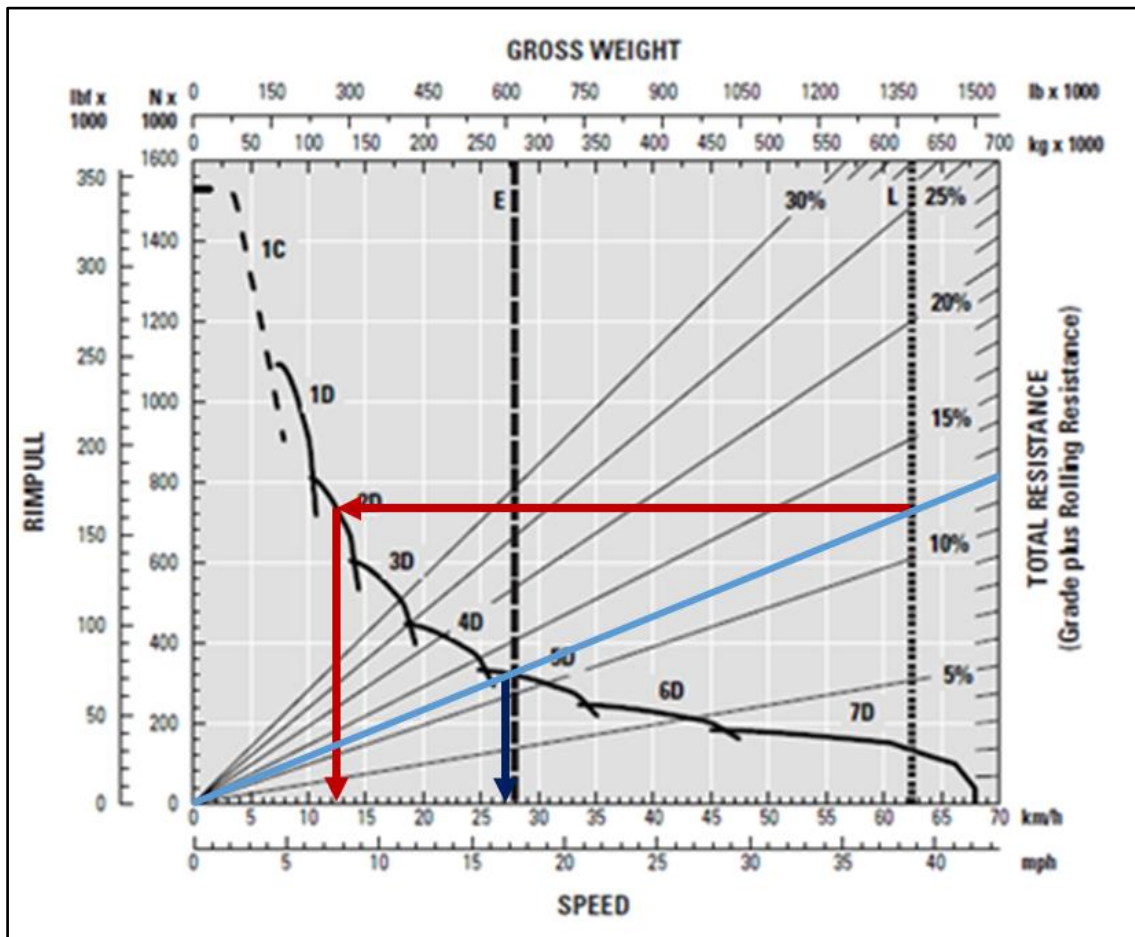


FIGURA C.1 Curva de tracción de camión Caterpillar 797F

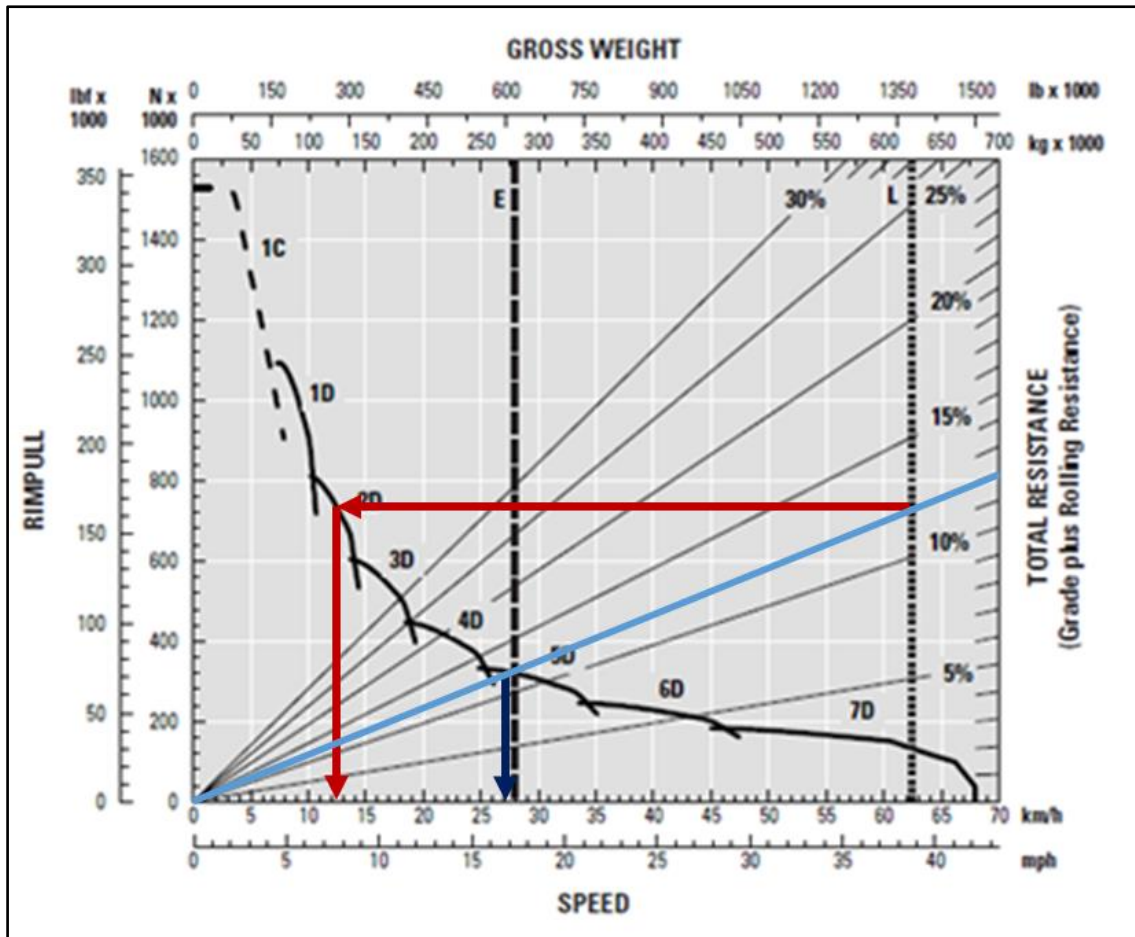


FIGURA C.2 Curva de retardo de camión Caterpillar 797F

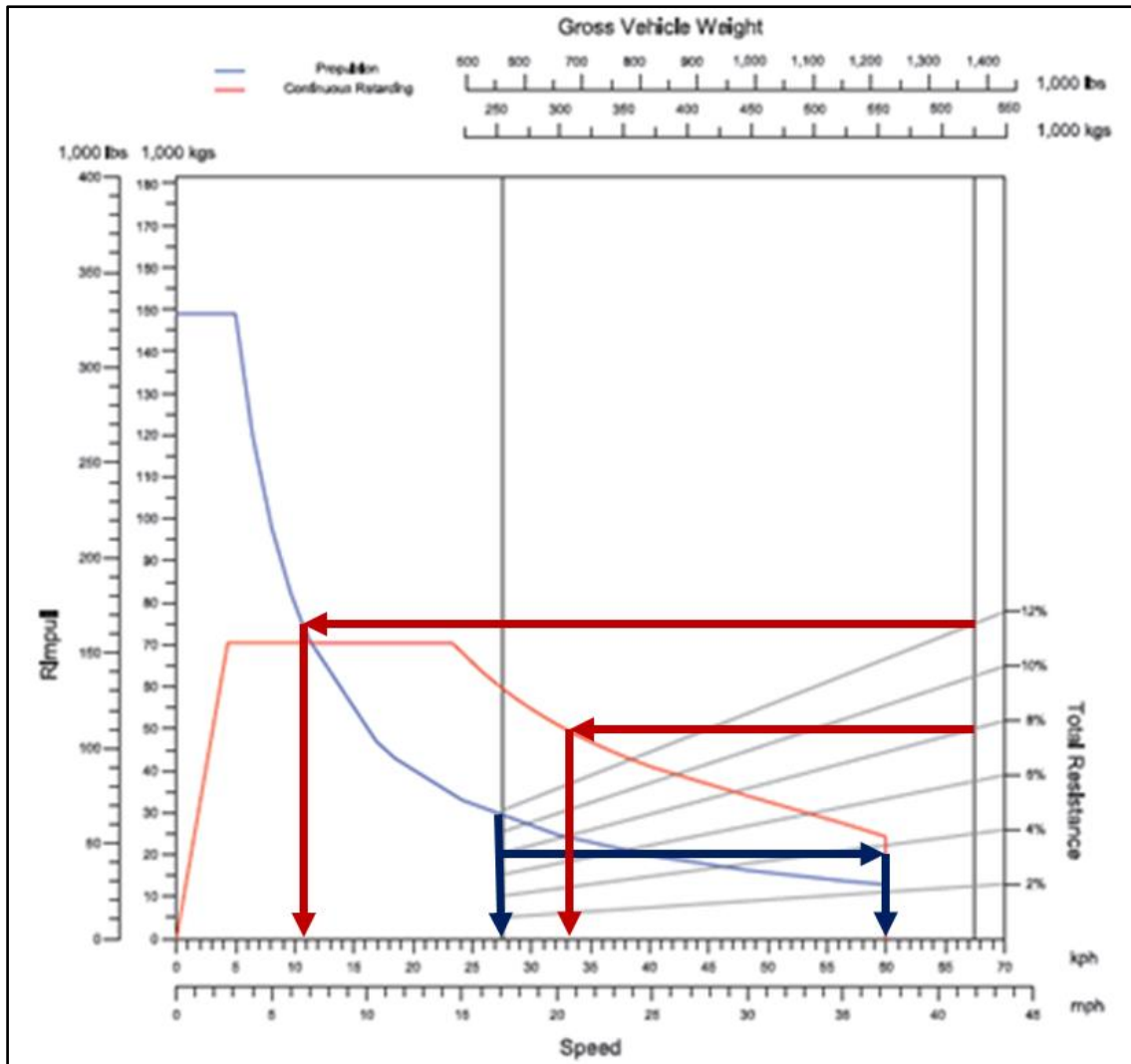


FIGURA C.3 Curva de tracción y curva de retardo de camión Komatsu 980E-4