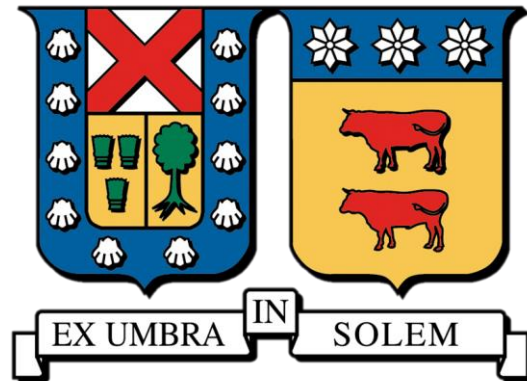


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE  
MATERIALES

SANTIAGO – CHILE



SISTEMA SIN IMPACTO AMBIENTAL PARA  
TRANSPORTE DE MINERAL EN PEQUEÑA  
MINERÍA

Presentado por:

**SEBASTIAN MAXIMILIANO CAROZZI BAEZA**

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL DE MINAS**

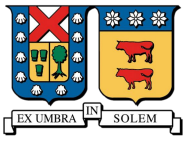
Profesor Guía:

**VÍCTOR ENCINA MONTENEGRO**

Profesor Correferente:

Marta Ortigosa A.

ENERO-2025



## Resumen

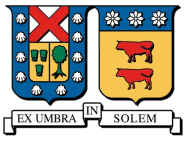
El proyecto minero San Lorenzo tiene como objetivo explotar vetas auríferas y otros minerales en la comuna de Alhué, Región Metropolitana de Chile. En la actualidad, se está llevando a cabo un proceso judicial para establecer la servidumbre necesaria que permita la construcción de las obras asociadas al proyecto.

El proyecto minero San Lorenzo considera la construcción de un camino de 5 km que conecte la carretera (Ruta G-692) con la zona de la mina. Este trazado bordea una viña perteneciente a privados, lo cual ha generado preocupación por el tránsito constante de camiones tolva cerca de la producción vitivinícola. Dada la topografía montañosa de la zona y la lejanía de otras rutas públicas, no resulta rentable diseñar un nuevo camino de acceso, por lo que las alternativas actuales incluyen paralizar indefinidamente el litigio para la servidumbre o plantear un método de transporte alternativo para el mineral.

En esta memoria se realizó una propuesta técnica de perfil para la implementación de un sistema de transporte con tecnología de andarivel que toma en cuenta las necesidades de producción de la mina, alternativo al de uso de camiones diésel con el objetivo de reducir el impacto ambiental y proporcionar una respuesta a las demandas de cese de acciones por parte del dueño del predio superficial.

La metodología de trabajo contempló un levantamiento de puntos del terreno para obtener un trazado óptimo en donde emplazar la ruta de cableado y torres de soporte del sistema, considerando las normas de construcción y operación de la literatura relacionada a esta tecnología para culminar en un diseño que entregó los resultados operacionales del sistema.

El diseño proyectado consta de la construcción de dos estaciones terminales conectadas mediante cableado a través de 17 torres de soporte, la distancia del trazado corresponde a 4.497 metros donde se circularían 28 baldes con carga mineral en descenso desde la mina y 28 baldes vacíos que subirían de vuelta. Para el movimiento mecánico del sistema se calculó una potencia requerida de 6,1 kW y un requerimiento energético de 54,8 kWh diario a razón de mantener una producción mensual de 3.000 toneladas.



## Abstract

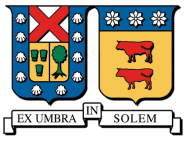
The San Lorenzo mining project aims to exploit gold-bearing veins and other minerals in the locality of Alhué, located in Chile's Metropolitan Region. Currently, a legal process is underway to establish the necessary easement for the construction of the works associated with the project.

As part of its development, the San Lorenzo mining project plans to build a 5 km road connecting the highway (Route G-692) to the mine area. This route runs alongside a privately-owned vineyard, raising concerns about the constant flow of haul trucks near the winery's production. Due to the mountainous terrain and the distance from other public roads, designing a new access road is not economically feasible. Consequently, the current options involve indefinitely halting the legal proceedings for the easement or proposing an alternative method for transporting the mineral.

In this report, a preliminary technical proposal was developed for implementing an alternative transport system to replace the use of diesel trucks, with the aim of reducing environmental impact and addressing the landowner's demands for a cessation of activities on the surface property.

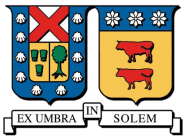
The work methodology included a survey of terrain points to determine the optimal layout for placing the cable route and support towers of the system. This was conducted considering the construction and operational standards found in the literature related to this technology, resulting in a design that provided the system's operational outcomes.

The projected design consists of the construction of two terminal stations connected by cables spanning 17 support towers. The route covers 4.497 meters, where 28 buckets carrying mineral loads will descend from the mine and 28 empty buckets will return upward. The mechanical operation of the system has a power requirement of 6.1 kWh and an energy requirement of 54,8 kWh to sustain a production rate of 3,000 tons per month.



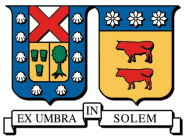
## Nomenclatura

$v$	Velocidad (m/s)
$d$	Espaciamiento entre baldes de mineral (m)
$t$	Intervalo entre baldes de mineral (s)
$l$	Masa de mineral en el balde (kg)
$n$	Producción por hora (t)
$h$	Flecha (m)
$w$	Carga distribuida (N/m)
$s$	Longitud de tramo (m)
$t_o$	Tensión de carga de trabajo (N)
$w_l$	Carga distribuida con mineral circulando (N/m)
$w_e$	Carga distribuida sin mineral circulando (N/m)
$e$	Masa del balde vacío (kg)
$r$	Peso del cable (N/m)
$T$	Tensión (N)
$V$	Distancia vertical entre ambos terminales (m)
$f'$	Coefficiente de fricción de rodadura (0,02)
$H$	Largo horizontal del trazado (m)
$P$	Potencia (kW)
$p$	Masa de mineral total a mover por ciclo (kg)
$L$	Distancia vertical entre ambos terminales (m)
$C$	Tiempo de ciclo (s)
$\eta$	Eficiencia (0,85)
$E$	Energía (kWh)
$T_E$	Tiempo efectivo de operación (horas)
$f_e$	Factor de emisión de partículas (g/km)
$k$	Constante de emisión (1,5 para camiones; 1,8 para vehículos livianos)
$s_{MP}$	Contenido de material fino en la superficie; (8,5%)
$W$	Peso promedio de flota en el camino (t)
$S$	Velocidad media vehicular (km/h)
$M$	Humedad del material superficial; (6,5%)
$C_{10}$	Constante de emisión para vehículos livianos (0,132493)

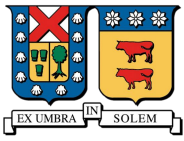


## Índice

1	Introducción .....	9
1.1	Objetivo principal .....	9
1.2	Objetivos específicos .....	9
1.3	Alcance .....	9
2	Antecedentes .....	9
3	Tecnologías disponibles .....	11
3.1	Transporte de mineral mediante Camiones.....	11
3.2	Transporte de mineral mediante Andariveles .....	13
4	Parámetros de diseño del andarivel .....	16
4.1	Tipo de Andarivel .....	16
4.1.1	Sistema Monocable continuo .....	16
4.1.2	Sistemas Bicable.....	17
4.2	Torres de soporte .....	18
4.3	Velocidad de transporte .....	19
4.4	Espaciamiento entre baldes.....	19
4.5	Número de baldes de carga.....	20
4.6	Dimensiones Balde .....	20
4.7	Flecha.....	21
4.8	Tensión en el cable .....	22
4.9	Despeje vertical.....	25
4.10	Potencia del sistema.....	25
4.11	Energía.....	27
4.12	Levantamiento de polvo.....	27
4.13	Senderos provisionales.....	28
5	Dimensionamiento de sistemas de transporte .....	28
5.1	Definición del caso de estudio .....	28
5.2	Trabajo en terreno .....	29
5.3	Curvas de nivel .....	30
5.3.1	Imágenes SRTM.....	30
5.3.2	ArcGIS ArcMap .....	31
5.4	Planimetría conceptual.....	31
5.4.1	Autodesk AutoCAD .....	31
5.4.2	Cambio de DATUM.....	32

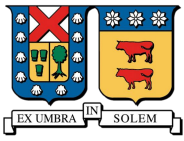


5.5	Transporte por camiones.....	32
5.5.1	Carga por camión .....	32
5.5.2	Velocidad media de transporte .....	32
5.5.3	Viajes por día.....	32
5.5.4	Potencia media por camión .....	33
5.6	Transporte por andarivel.....	33
5.6.1	Tipo de sistema.....	33
5.6.2	Turnos de trabajo efectivo .....	33
5.6.3	Trazado óptimo.....	33
5.6.4	Ubicación de las obras .....	35
5.6.5	Tramos del trazado .....	37
5.7	Parámetros operacionales .....	38
5.7.1	Tipo de cables.....	38
5.7.2	Carga en el circuito.....	38
5.7.3	Tensión requerida en el sistema .....	39
5.7.4	Potencia calculada .....	39
5.7.5	Energía diaria para mover el sistema.....	40
5.7.6	Levantamiento de polvo .....	40
5.7.7	Caminos y senderos auxiliares .....	41
5.7.8	Planos topográficos .....	42
5.7.9	Perfiles topográficos.....	42
6	Resultados .....	44
6.1	Resumen de rendimiento del sistema.....	44
6.2	Impacto ambiental.....	45
7	Conclusiones .....	47
8	Recomendaciones.....	48
9	Referencias.....	49
10	Anexos .....	50
10.1	Anexo A.....	50
10.2	Anexo B.....	57



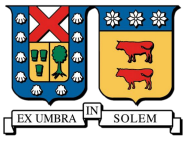
## Lista de Figuras

<b>Figura 1:</b> Vista aérea de la viña y el sector del yacimiento. ....	10
<b>Figura 2:</b> Esquema del proceso de carguío de material para ser transportado. ....	12
<b>Figura 3:</b> Teniente (Yunge, 1909). ....	14
<b>Figura 4:</b> Compañía Minera Tocopilla (SONAMI, 1910). ....	14
<b>Figura 5:</b> Sistema de andarivel de Claughton (National Transport Trust, 2024). ....	15
<b>Figura 6:</b> Proceso de descarga de material en Claughton (Forterra, 2024). ....	15
<b>Figura 7:</b> Funcionamiento mecánico de un sistema monocable (Booth, 1965). ....	17
<b>Figura 8:</b> Funcionamiento mecánico de un sistema bicable (Booth, 1965). ....	18
<b>Figura 9:</b> Secciones frontal y de perfil del balde transporte (Durham, 1948). ....	21
<b>Figura 10:</b> Fuerzas que influyen en la flecha (Lagerev, A.V., 2019). ....	22
<b>Figura 11:</b> Dispositivo GPS Serie Juno (Manual de usuario Trimble). ....	29
<b>Figura 12:</b> Esquema de conversión de ráster a curvas de nivel (ESRI, 2024). ....	30
<b>Figura 13:</b> Imagen SRTM de la zona de trabajo (Nasa, 2024). ....	31
<b>Figura 14:</b> Visualización del trazado de catenarias en ArcMap. ....	34
<b>Figura 15:</b> Vista general A. ....	34
<b>Figura 16:</b> Vista general B. ....	35
<b>Figura 17:</b> zona de acopio (rosa) en el sector de operaciones mina. ....	36
<b>Figura 18:</b> Patio de maniobras (gris), baños y zona de acopio en el sector de descarga. ....	37
<b>Figura 19:</b> Tramo 1 (inicial). ....	43
<b>Figura 20:</b> Tramo 5. ....	43
<b>Figura 21:</b> Tramo 18 (final). ....	44



## Lista de Tablas

<b>Tabla 1:</b> Producción proyectada Mina San Lorenzo.....	20
<b>Tabla 2:</b> Detalle de medidas del balde de transporte (Durham, 1948).....	21
<b>Tabla 3:</b> Parámetros de operación referenciales (Durham, 1948). ....	24
<b>Tabla 4:</b> Especificaciones de cables de acero trenzado (Hartman et al., 2002).....	25
<b>Tabla 5:</b> Coordenadas UTM Según Datum PSAD56 y ZONA 19 Sur. ....	35
<b>Tabla 6:</b> Parámetros de diseño en cada tramos de catenaria. ....	37
<b>Tabla 7:</b> Parámetros operacionales del circuito.....	38
<b>Tabla 8:</b> Tensión en el cable en cada tramo del circuito. ....	39
<b>Tabla 9:</b> Dimensionamiento de caminos y senderos. ....	41
<b>Tabla 10:</b> Longitudes de senderos auxiliares destinados a las obras.....	42
<b>Tabla 11:</b> Principales parámetros de rendimiento entre ambos tipos de transporte. ....	44
<b>Tabla 12:</b> Impacto ambiental entre ambos tipos de transporte. ....	46



# 1 Introducción

## 1.1 Objetivo principal

Evaluar el sistema de transporte descendente por andarivel para un caso de pequeña minería

## 1.2 Objetivos específicos

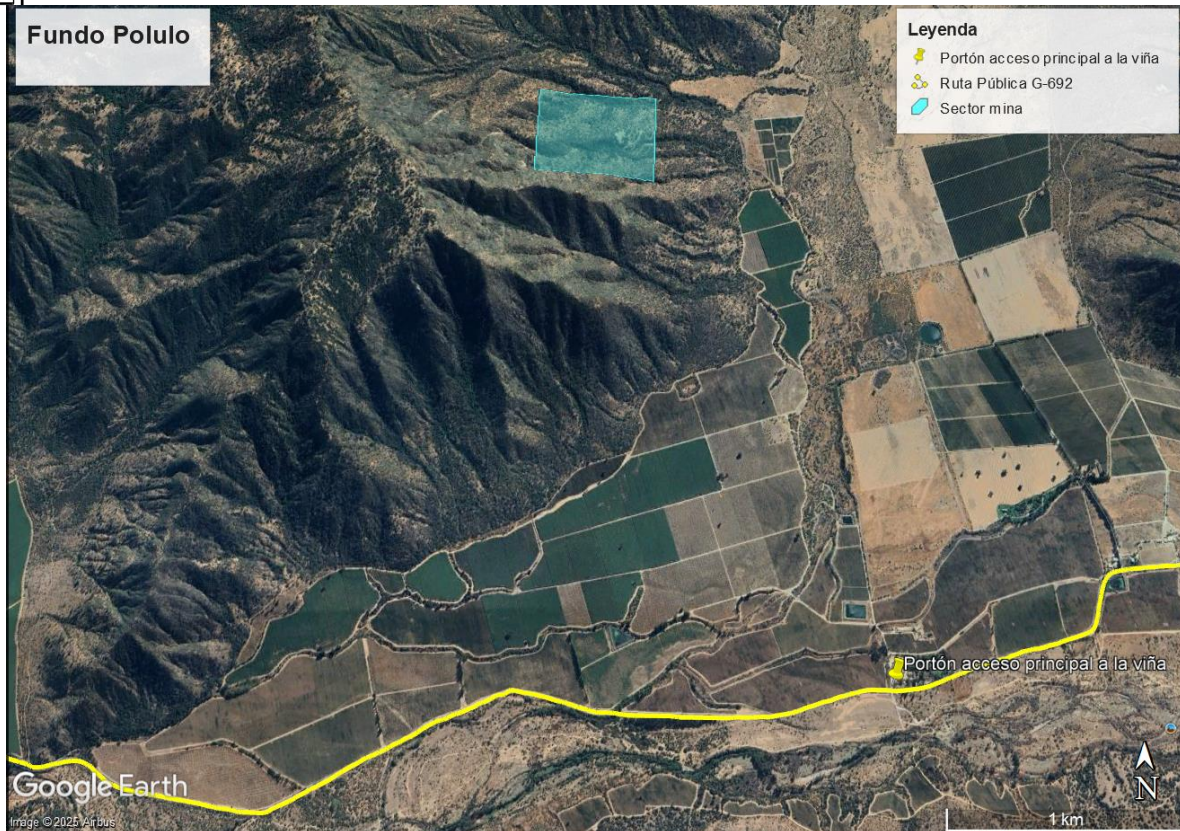
- Diseñar el sistema de transporte descendente por andarivel
- Evaluar la factibilidad técnica del proyecto
- Comparar el impacto ambiental de la solución de andarivel versus el transporte por camiones

## 1.3 Alcance

Los alcances de este proyecto abarcan la factibilidad técnica desde el proceso de carguío y transporte de la zona de acopio planificada para la mina San Lorenzo su trayecto hasta la convergencia con la red vial pública en la ladera del sector montañoso.

# 2 Antecedentes

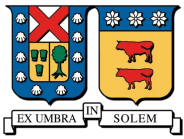
El proyecto minero San Lorenzo busca explotar un depósito emplazado en forma de vetas auríferas y de otros minerales en la comuna de Alhué, ubicada en la región Metropolitana, Chile. El depósito se encuentra contenido en una unidad intrusiva, de rocas Granodioritas asociadas al cuerpo plutónico Alhué a una altura media de 260 m.s.n.m. en el sector Fundo Polulo, donde se emplaza la viña. Actualmente se encuentra en marcha el proceso judicial para instaurar la servidumbre pertinente para las obras de construcción.



*Figura 1: Vista aérea de la viña y el sector del yacimiento.*

El proyecto contempla tres túneles de acceso y explotación hacia el cuerpo mineralizado que se busca explotar, un sector de desmonte o acopio de estéril, instalaciones de oficinas y servicios para los operadores de la faena, y finalmente un camino de aproximadamente 5 kilómetros para el acceso a las pertenencias desde la carretera (Ruta G-692) bordeando la viña, pero dentro del predio superficial de la viña, motivo por el cual se mantiene en pausa la construcción y puesta en marcha del proyecto debido a las preocupaciones de los propietarios la viña ante el impacto ambiental que puede ocasionar el uso constante de camiones tolva en cercanías de su producción.

Las condiciones del relieve, particularmente montañoso y la distancia a otras vías públicas hacen inviable económicamente proyectar otra ruta de acceso a la mina, dejando actualmente como alternativas aplazar el proceso judicial indefinidamente o presentar una contraoferta replanteando el método de transporte de mineral.



En términos de producción, el proyecto minero San Lorenzo se encuentra dentro del rango de pequeña minería, proyectando 3.000 toneladas mensuales de mena de oro, cobre y subproductos, con una vida útil estimada de 43 meses según la planificación actual.

### **3 Tecnologías disponibles**

En la actualidad, la minería opera mediante la intervención directa en la ubicación en donde se encuentra dispuesto el yacimiento con interés económico, donde se extrae el material para ser trasladado. El alcance de estas operaciones incluye el acopio, el carguío y el transporte. Por lo anterior se hace necesario elaborar un plan de transporte desde la mina hasta dichos puntos. En general para la minería a pequeña escala, esto suele realizarse mediante transporte terrestre, particularmente haciendo uso de camiones de combustión, correas transportadoras o vía ferrocarril siempre y cuando las características del terreno y el solvencia económica del minero lo permitan.

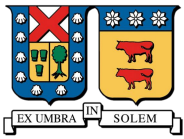
Inicialmente, los minerales y productos derivados de plantas son llevados a áreas zonas de acopio, donde se preparan antes de continuar con su carga y transporte.

En cuanto al transporte, este se refiere al traslado mediante camiones hacia una planta de tratamiento (en el caso de minerales) o hacia una fundición (para concentrados y precipitados). Este tipo de transporte implica recorridos a mayores distancias, utilizando vías públicas y, en ocasiones, atravesando zonas urbanas.

#### **3.1 Transporte de mineral mediante Camiones**

Actualmente gran parte de las operaciones mineras de pequeña escala manejan el carguío y transporte de minerales utilizando camiones convencionales tolva, los cuales se cargan en su respectiva zona de acopio por maquinaria de carguío como lo sería un cargador o excavadora.

La preferencia por el uso de este medio de transporte radica en varios factores:



- Accesibilidad y Costos al ser una tecnología globalizada y ampliamente estudiada.
- Versatilidad al momento de implementarlos en sectores rurales y/o de poca conectividad.
- Facilidad de mantención y/o reemplazo.

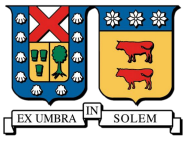


*Figura 2: Esquema del proceso de carguío de material para ser transportado.*

En el caso del proyecto Minera San Lorenzo se contempla el uso de un camión tolva de 12 m<sup>3</sup> similar al expuesto en la **Figura 2**. El cual transitaría un camino de tierra de alrededor de 3.2 km de extensión desde el control mina hasta la carretera G-692.

Sin embargo, debido a la ubicación excepcional en donde se ubica el yacimiento, el trazado planificado para la ruta de transporte se encuentra en conflicto directo con los intereses del ente propietario del terreno. Motivo por el cual juegan en contra específicos efectos adversos del uso de camiones diésel:

- Emisiones.
- Contaminación acústica.
- Levantamiento de polvo.



### 3.2 Transporte de mineral mediante Andariveles

El uso de sistemas de andarivel para el transporte en la minería es una tecnología que ha sido adoptada en diversas regiones del mundo debido a sus ventajas en términos de eficiencia, costos y reducción de impacto ambiental. Los sistemas de andarivel, también conocidos como teleféricos o funiculares, permiten el transporte de materiales y personal en terrenos difíciles y a grandes alturas, lo que es común en las operaciones mineras.

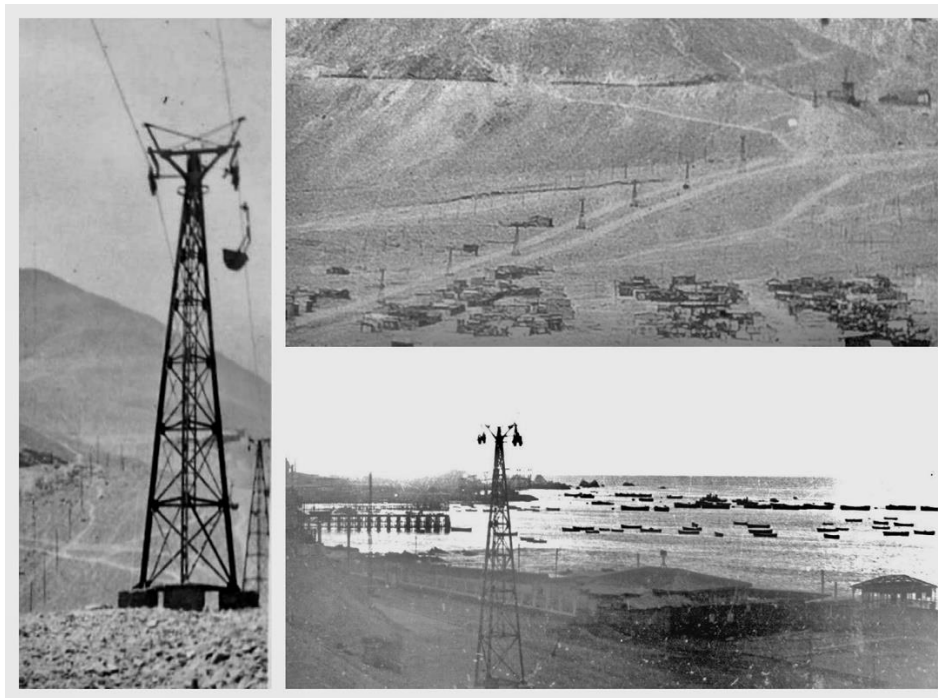
Su diseño mecánico consta de estaciones (terminales), uno o más cables (soporte y tracción); torres de soporte; poleas y contrapesos colgantes para mantener la tensión en los cables.

Una característica de los sistemas de transporte mediante andarivel es un relativo elevado costo inicial, el cual puede variar dependiendo de las dimensiones del sistema y de las condiciones del terreno en donde se quiere emplear, en particular cuando se quiere implementar en cordones montañosos de difícil acceso. Además, normalmente es más sencillo adquirir derechos de paso para teleféricos que para otros sistemas. Las cuerdas pueden colocarse a alturas necesarias para evitar carreteras, ferrocarriles, edificios y tierras cultivadas (Booth, 1965).

En Chile, esta tecnología de transporte se viene utilizando desde inicios del siglo XX, con la instauración de sistemas de transporte por cable como el de la mina El Teniente, ubicada en la sexta región y el sistema de transporte de la Compañía minera Tocopilla utilizando la misma tecnología (ver **Figuras 3 y 4**).



*Figura 3: Teniente (Yunge, 1909).*



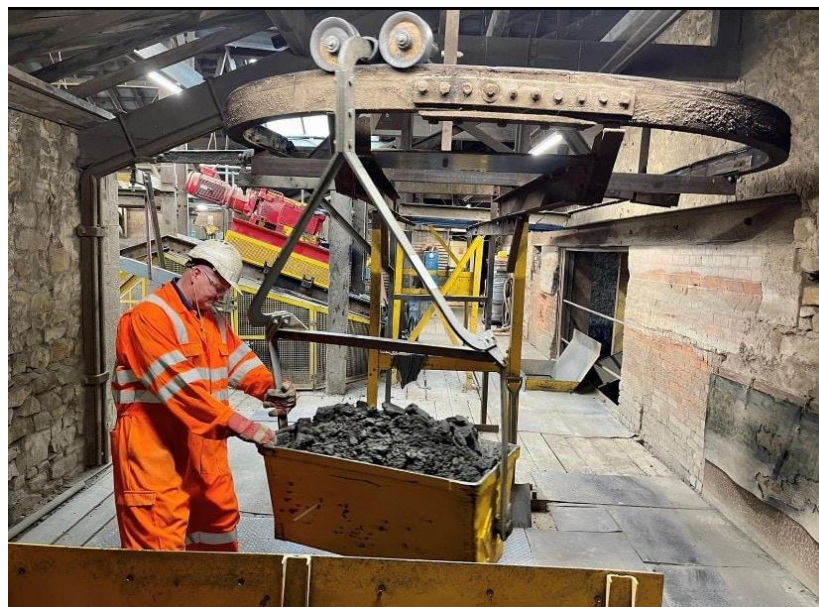
*Figura 4: Compañía Minera Tocopilla (SONAMI, 1910).*

En la actualidad aún existen muchas minas operando con este sistema de transporte, una de ellas es el caso de la mina de arcilla Claughton, propiedad de la compañía Forterra ubicada en Lancashire, Reino Unido (ver **Figura 5**). Cuya particularidad radica en ser la última mina localizada en Reino Unido que utiliza el transporte por andarivel de sistema monocable operado solamente con energía gravitatoria y frenos desde el año 1924.

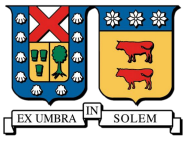


*Figura 5: Sistema de andarivel de Claughton (National Transport Trust, 2024).*

El transporte en Claughton se realiza mediante un sistema de andarivel monocable a través de 2 kilómetros de campo con un descenso de alrededor de 228 metros desde la zona de carguío hasta la planta de procesamiento en un ritmo de producción de 250 toneladas por hora. Cuya operación de carga y descarga se realiza con 2 operadores en cada estación (National Transport Trust, 2024) como se puede observar en la **Figura 6**.



*Figura 6: Proceso de descarga de material en Claughton (Forterra, 2024).*



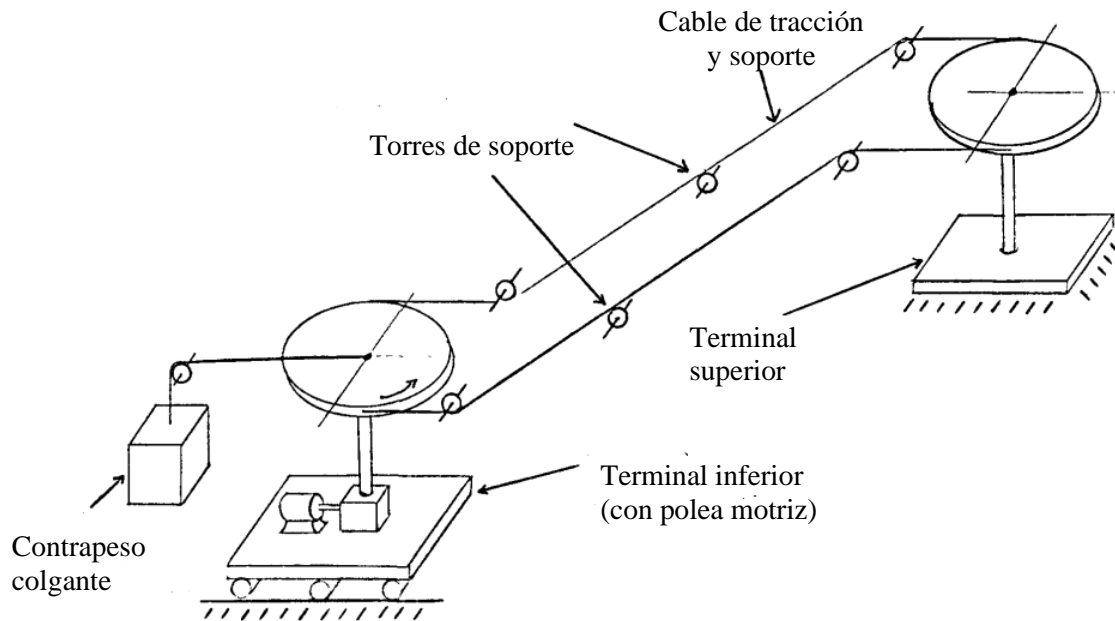
## 4 Parámetros de diseño del andarivel

### 4.1 Tipo de Andarivel

Existen dos principales tipos de andarivel que tienen el potencial de ser viables según las características de la problemática que se plantea resolver, los sistemas de andarivel monocable y los sistemas bicable, cuya diferencia fundamental es la cantidad de cables de transporte que son utilizados.

#### 4.1.1 Sistema Monocable continuo

Estos tipos de sistemas cuentan con un solo cable en un circuito continuo, el cual cumple dos roles fundamentales, el primero es el de soporte de la carga que está siendo transportada; el segundo rol fundamental es el del ejercicio de la fuerza de tracción de la carga hacia su destino a lo largo del trayecto. En cada estación terminal se instalan poleas de gran diámetro para circular el cable. Generalmente estos sistemas cuentan con una unidad motriz en uno de los terminales que proporciona energía al sistema en caso de ser necesaria (ver **Figura 7**), sin embargo, estos sistemas pueden funcionar mediante fuerza gravitatoria como su única fuente de energía para el desplazamiento.

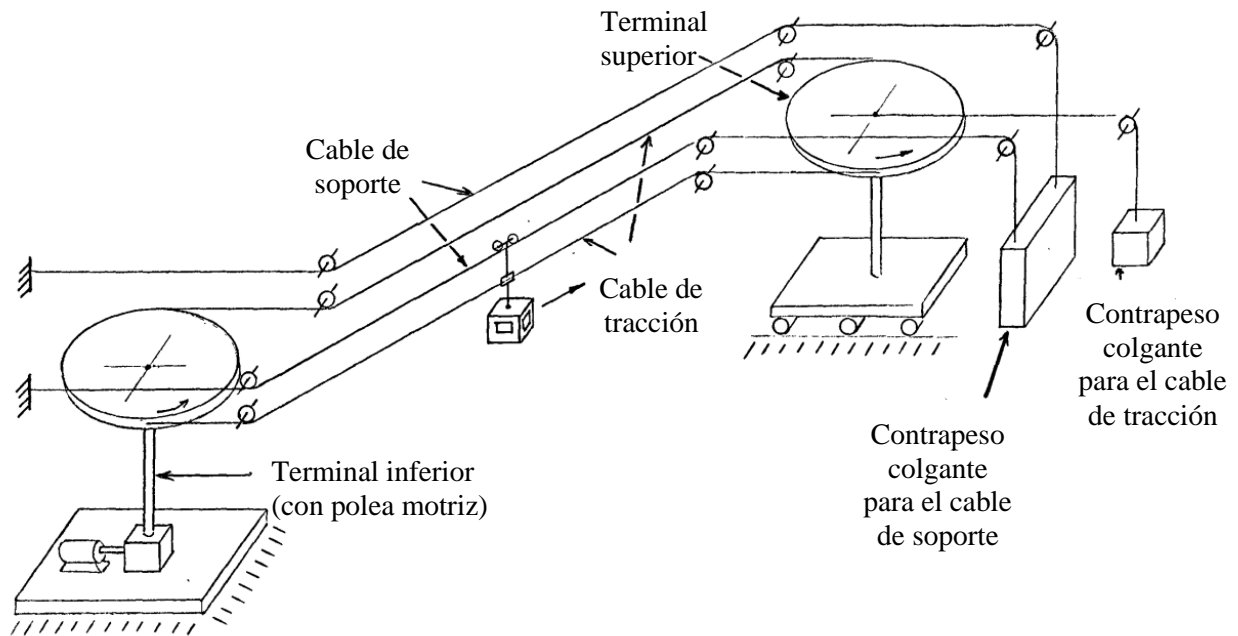


*Figura 7: Funcionamiento mecánico de un sistema monocable (Booth, 1965).*

La aplicación de estos sistemas está condicionada por la cantidad de carga que se requiera movilizar y la distancias que recorrerá la carga. Su principal ventaja frente a los sistemas bicable es su simplicidad mecánica, dando lugar a un menor coste de implementación y mantenimiento.

#### **4.1.2 Sistemas Bicable**

Los sistemas bicable cuentan con una configuración más compleja que los monocable debido a que utilizan simultáneamente dos cables para el transporte, uno de ellos es el cable de soporte, con más robustez, cuya principal función es mantener estable el peso de la carga en el trayecto; el otro cable se define como cable de tracción, cuya función es dar movimiento al sistema siendo impulsado por una estación motriz (Ver **Figura 8**).

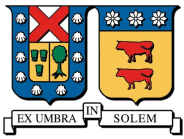


**Figura 8:** Funcionamiento mecánico de un sistema bicable (Booth, 1965).

La principal ventaja que proporciona el sistema bicable es el aumento de la capacidad de carga que se puede transportar frente a un sistema monocable, esto sumado a una mayor estabilidad frente a vientos y condiciones climáticas desfavorables. Sin embargo, su mayor complejidad mecánica supone un aumento en los costos de instalación y un montaje más intrincado.

## 4.2 Torres de soporte

Las torres de soporte sostienen el cable a lo largo del recorrido, manteniéndolo elevado y estable a la altura necesaria para que los baldes, sillas o góndolas se muevan sin obstrucciones desde la estación de carga hasta la estación de descarga. Asimismo, las torres ayudan a mantener la tensión adecuada en el cable. Esta tensión es crucial para asegurar que el cable permanezca en su posición correcta, evitando que se hunda demasiado entre las torres o se desplace lateralmente.



La ubicación de las torres del sistema se definió en primera instancia mediante la medición de puntos utilizando el dispositivo GPS e inspección visual del terreno. A consecuencia de la definición de más parámetros operacionales y el trabajo de software se replanteó en cada proceso la óptima ubicación de cada elemento hasta llegar a un diseño preliminar tomando en cuenta los alcances de este proyecto.

### 4.3 Velocidad de transporte

Se refiere a la velocidad con la cual la carga se traslada a lo largo del cable de andarivel gracias a la fuerza gravitacional u otro factor de energía.

Para este caso de estudio se consideró una velocidad de transporte estándar para sistemas continuos de transporte mediante andarivel (Durham, 1948).

$$v = 2 \frac{m}{s}$$

### 4.4 Espaciamiento entre baldes

Según Durham, para sistemas continuos de transporte, se considera la ecuación (1) para determinar el espaciamiento práctico entre cada balde con carga mineral, todas las ecuaciones se expresan en el sistema internacional (SI).

$$d = v * t \tag{1}$$

Donde el tiempo de cada intervalo entre baldes se calcula considerando la capacidad de carga de cada uno de ellos, según la ecuación (2).

$$t = 3600 \frac{l}{n} \tag{2}$$

Debido a la escala del proyecto, es decir, de su relativa baja producción se consideran baldes con una capacidad de alrededor de 362.4 kg (800 libras) de mineral.



#### 4.5 Número de baldes de carga

El número de baldes carga mineral dependerá de la necesidad de la mina en cuanto a términos de producción, al largo del recorrido de los cables de andarivel y a la capacidad de carga de cada balde.

La mina San lorenzo proyecta el ritmo de producción mostrado en la **Tabla 1**, considerando los parámetros dados de turnos de trabajo de 9 horas efectivas.

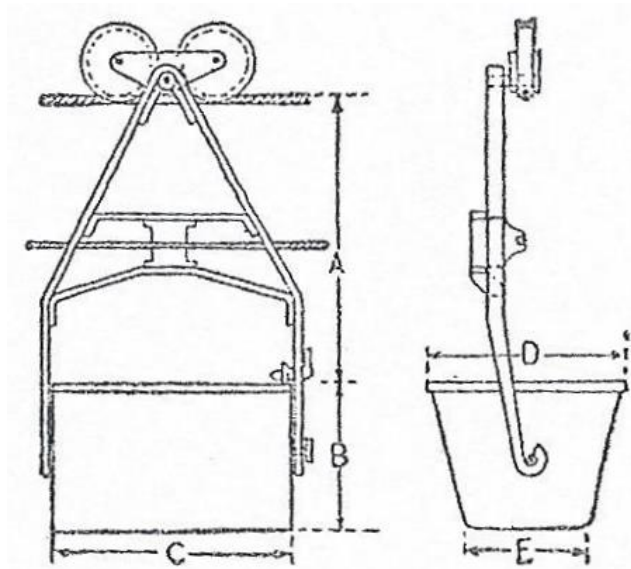
*Tabla 1: Producción proyectada Mina San Lorenzo.*

<b>Producción</b>	<b>Cantidad, ton</b>
<b>Anual</b>	36.000
<b>Mensual</b>	3.000
<b>Diaria</b>	150
<b>Hora</b>	16,7

Con el largo del recorrido correspondiente a 4.497 m mencionado en incisos anteriores al igual que la capacidad de carga para cada balde es posible calcular el número de baldes para cada recorrido del sistema proyectado de andarivel. Se tiene en cuenta que para este caso se segmenta entre el recorrido de bajada (baldes cargados con mineral) y el recorrido de subida (baldes vacíos) que permita verificar la viabilidad del sistema.

#### 4.6 Dimensiones Balde

Se consideraron medidas estándar de baldes utilizados en andariveles tomando en cuenta el requerimiento de producción que presenta la mina. En la **Figura 9** se muestra la forma del balde proyectado para las operaciones de transporte, mientras que en la **Tabla 2** se presenta el detalle de las dimensiones de este.



**Figura 9:** Secciones frontal y de perfil del balde transporte (Durham, 1948).

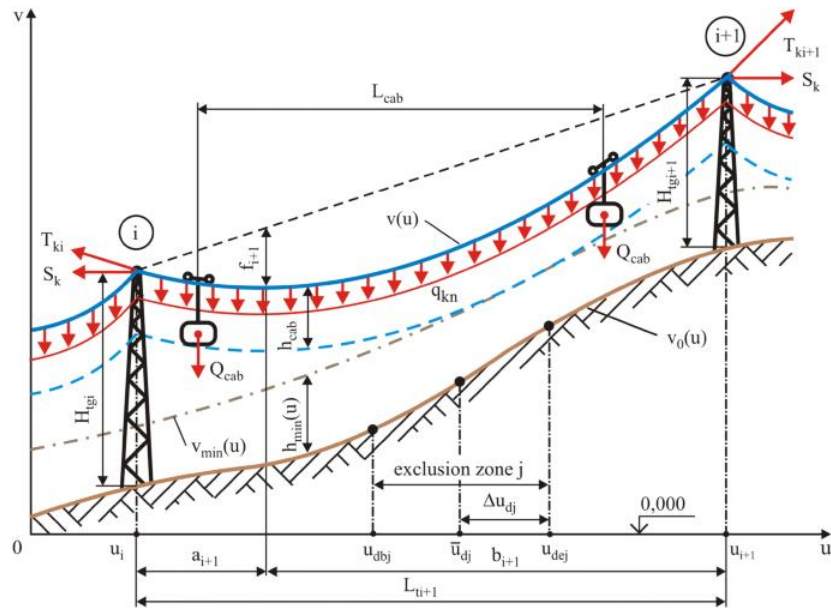
**Tabla 2:** Detalle de medidas del balde de transporte (Durham, 1948).

Sección	Longitud, pies	Longitud, cm
A	3,5	107
B	1,8	56
C	2,9	89
D	1,8	53

#### 4.7 Flecha

Corresponde a la flexión o hundimiento que ocurre en los cables de acero que recorren los sistemas de andarivel y teleféricos, es un parámetro de diseño que determina la viabilidad debido a que afecta la eficiencia, funcionalidad y seguridad del sistema.

Este fenómeno que resulta de la interacción entre el peso del cable y de la carga que se transporta en conjunto con la tensión aplicada en el sistema y distanciamiento de torres. En la **Figura 10**, se pueden apreciar las fuerzas que inducen la ocurrencia de la flecha en menor o mayor medida, se puede observar en la línea segmentada la trayectoria recta que debiera tener el cable ante la ausencia de las fuerzas.



**Figura 10:** Fuerzas que influyen en la flecha (Lagerev, A.V., 2019).

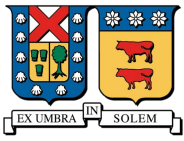
Para el cálculo de este parámetro se consideró la ecuación (3) para cálculo de flecha simplificada del manual de Durham aplicada a cada tramo o segmento de catenaria entre torres del diseño preliminar y final.

$$h = \frac{ws^2}{8t_o} \tag{3}$$

A partir de este parámetro fue posible hacer replanteos al sistema debido a posibles riesgos de seguridad producto del relieve de la zona de operación.

#### 4.8 Tensión en el cable

Es un factor operacional determinante para estimar la viabilidad de este mecanismo de transporte. Esta dependerá de las características del cable y de la carga que se está ejerciendo en el sistema de catenarias, como dicha carga es variable dependiendo de si el



trayecto es de subida y bajada. La tensión que requiere el cable del sistema se puede calcular mediante la aplicación de tres ecuaciones (Durham, 1948).

Se definen primero ecuaciones para determinar la carga distribuida en el cable en los dos posibles casos para el proyecto; primero el descenso de los baldes cargados desde la mina según la ecuación (4); luego el ascenso de los baldes vacíos desde la estación de descarga en la base de la montaña siguiendo la ecuación (5).

$$w_l = \frac{l + e}{d} + r \quad (4) \quad ; \quad w_e = \frac{e}{d} + r \quad (5)$$

Definidas las cargas distribuidas, la ecuación (6) entrega como resultado el valor de la tensión requerida por el sistema, al sumar las tensiones en ambos casos.

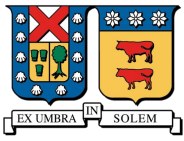
$$T = wV \pm f'wH \quad (6)$$

De acuerdo con Durham, la aplicación de la ecuación (6) depende del trayecto que se está evaluando, si se trata de la bajada de carga desde la mina, la operación de la ecuación es menos (-), si se evalúa la subida de los baldes vacíos hacia la mina, el símbolo corresponde a un más (+). Por lo tanto, la tensión que se requiere en el cable al momento del ascenso es en general mayor.

La tensión es un parámetro que puede ser ajustado dependiendo de otros requerimientos, como alcanzar un valor aceptable para la flecha (ver sección 4.7), motivo por el cual existe la aplicación de contrapesos que no excedan 1/5 de la resistencia de rotura del cable (Booth, 1965) y tensión extra generalmente aplicada mediante la polea motriz anclada en las estaciones terminales base.

Se plantea la utilización de dos tipos de cables de acero para el sistema propuesto:

- 1) **Cables de acero trenzados:** son un tipo especializado de cable de acero compuesto por alambres enrollados en espiral que se entrelazan de manera precisa para formar una estructura densa, uniforme y altamente resistente. Este diseño los hace ideales



para aplicaciones donde se requiere una combinación de alta resistencia, durabilidad y una superficie externa suave.

- 2) **Cables de acero lisos:** son similares a los cables trenzados, pero se distinguen por una construcción más básica y generalmente menos densa, orientada a aplicaciones donde se requiere una superficie más suave y un diseño compacto, pero no necesariamente la máxima resistencia estructural.

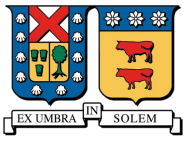
La **Tabla 2** muestra una recomendación empírica de Durham en cuanto a parámetros operacionales sobre los cables para sistemas de andarivel del tipo monocable y bicable según la producción estimada de la faena.

*Tabla 3: Parámetros de operación referenciales (Durham, 1948).*

Tonelaje por hora	Diámetro de cables de acero, mm		Cargas, kg			separación entre cables, m
	Lado cargado	Lado vacío	peso de material	peso de balde	carga total	
<b>5 a 10</b>	25	22	227	136	362	2
<b>15 a 20</b>	29	22	317	181	498	2
<b>25 a 30</b>	32	22	408	193	600	2 a 2,5
<b>40 a 50</b>	35	22	544	204	747	2,5
<b>60 a 75</b>	38	25	725	227	951	2,5
<b>80 a 100</b>	41	25	906	249	1155	2,5 a 3

De acuerdo con las especificaciones de Durham y otros autores, los cables de acero trenzado son los más comunes para estos tipos de sistemas de carguío.

En la **Tabla 3** se presenta información recopilada de Hartman y Mutmansky (2002) sobre cables de acero trenzado



**Tabla 4:** Especificaciones de cables de acero trenzado (Hartman et al., 2002).

<b>Acero de arado mejorado</b>			
<b>Diámetro mm</b>	<b>Peso kg/m</b>	<b>Resistencia a la rotura kN</b>	<b>Carga de trabajo kN</b>
<b>19</b>	2,0	311	104
<b>22</b>	2,8	409	136
<b>25</b>	3,6	548	183
<b>29</b>	4,9	677	226
<b>32</b>	5,6	818	273
<b>35</b>	7,1	1.023	341
<b>38</b>	8,4	1.201	400
<b>41</b>	10,2	1.379	460
<b>44</b>	11,2	1.619	540
<b>48</b>	13,4	1.886	629
<b>51</b>	14,5	2.135	712

\*Carga de trabajo considerando un factor de seguridad de 3.

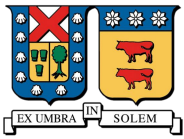
#### **4.9 Despeje vertical**

El despeje vertical corresponde a la distancia mínima vertical permitida entre la base de cada balde del sistema de andarivel y el suelo, o en su defecto cualquier obstáculo que sea sobrevolado.

El estándar que se consideró para el diseño de este sistema es el del Departamento Gubernamental de Servicios Eléctricos y Mecánicos de Hong Kong (EMSD) el cual estipula una distancia mínima de 2.5 metros para los baldes que se encuentren en desplazamiento libre fuera de las estaciones.

#### **4.10 Potencia del sistema**

La potencia en los sistemas de teleférico puede ser desarrollada debido al mismo peso de las cargas que por fuerza gravitacional van descendiendo desde la estación de carguío. Es por ello que la presencia de inclinación en el diseño final del proyecto condicionará la aplicación de energía externa para mover el sistema mediante una polea motriz



funcionando con un motor o bien sólo el uso de frenos y disipadores de calor para detener el sistema cuando se lo requiera.

Debido a los desafíos del relieve producto de su localización en un sector muy montañoso, algunos tramos de la catenaria del proyecto pueden presentar una inclinación mientras otros una inclinación muy leve o nula. Debido a ello, para estimar en primera instancia la potencia se requiere tener establecido el diseño preliminar del sistema con la ubicación de las torres.

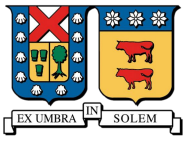
Según Durham, la tensión en el cable del sistema debe calcularse al momento de determinar si es necesario suministrar energía al sistema o si éste produce energía debido a las fuerzas gravitacionales. Utilizando las ecuaciones (4), (5) y (6) se puede obtener una estimación de la tensión requerida en el cable cuando se bajan los baldes cargados desde la mina y cuando se suben los baldes vacíos hacia ella. Las ecuaciones (7) y (8) representan en particular el caso del andarivel propuesto, donde T corresponde a la tensión del cable en descenso y S a la tensión del cable en ascenso.

$$T = w_l V - f' w_l H \quad (7) \quad ; \quad S = w_e V + f' w_e H \quad (8)$$

Posteriormente, si la diferencia entre T y S es positiva, esto es un indicador de que se el sistema desarrolla potencia debido a las fuerzas gravitacionales; en caso contrario, es necesario incorporar potencia para poder movilizar las cargas.

Se calculó la potencia requerida o generada considerando la ecuación (9), que corresponde a la ecuación de cálculo de potencia para el izaje de cargas en skip (SME Mining Reference Handbook, 2020), el cual presenta un primer acercamiento a la potencia que requeriría el sistema en el caso de que fuere necesario.

$$P = \frac{p * L}{102 * C * \eta} \quad (9)$$



#### 4.11 Energía

Para el cálculo energético que requieren los sistemas de transporte se tiene la ecuación (10) que representa la relación de energía, potencia y tiempo, con la cual se obtiene el requerimiento energético para mover la carga expresado en kWh.

$$E = P * T_E \quad (10)$$

Donde el parámetro  $T_E$  que representa el tiempo efectivo de operación del sistema en el rango de tiempo que se requiera analizar.

#### 4.12 Levantamiento de polvo

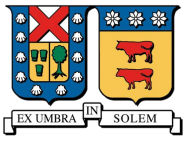
Para obtener un valor referencial para la suspensión de partículas producida debido al tránsito vehicular en caminos no pavimentados se considera la ecuación (11) y (12) creadas por la EPA (Environmental Protection Agency) expresadas en sistema internacional (Seremi del Medio Ambiente, 2020).

- **Factor de emisión para tránsito de vehículos pesados en caminos no pavimentados, en g/km:**

$$fe = k * 281,9 * \left(\frac{S_{MP}}{12}\right)^{0,9} * \left(\frac{W}{2,72}\right)^{0,45} \quad (11)$$

- **Factor de emisión para tránsito de vehículos livianos en caminos no pavimentados, en g/km:**

$$fe = \frac{k * 281,9 * \left(\frac{S_{MP}}{12}\right) * \left(\frac{S}{48,28}\right)^{0,5}}{\left(\frac{M}{0,5}\right)^{0,2}} - C \quad (12)$$



Para las constantes se mantienen valores estándar en ambas ecuaciones, considerando los valores:  $k = 1,5$  (*vehículos pesados*) y  $1,8$  (*vehículos livianos*);  $s = 8,5\%$  y  $M = 6,5\%$ .

#### **4.13 Senderos provisorios**

Para la implementación del sistema propuesto, se debe considerar la elaboración de senderos provisorios que divergen del camino proyectado para el acceso de la mina. El propósito de estos es el de movilización de personal y materiales de construcción destinados a la construcción y mantenimiento de las torres que forman parte del sistema de andarivel propuesto.

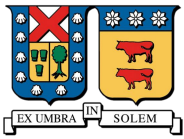
Se toma en consideración las normas expuestas en el Manual de Carreteras – Volumen N°3 Instrucciones y Criterio de Diseño – Edición 2024.

### **5 Dimensionamiento de sistemas de transporte**

#### **5.1 Definición del caso de estudio**

Se trabajó en base a los antecedentes que se conocen sobre la planificación de la compañía minera San Lorenzo Spa. en el proyecto Mina San Lorenzo, ubicada en la comuna de Alhué en las coordenadas UTM (PSAD 56) Norte 6.235.503 m. y Este 301.025 m., Cota 260 m.s.n.m. Cuyos recursos de interés inferidos en el macizo rocoso corresponden a 129,6 kilotoneladas, con lo cual se estima una duración de 49 meses incluyendo 2 meses de realización de instalación de faena para reacondicionamientos de caminos, instalación de polvorín, cancha de acopios, cercos perimetrales, energía y otras labores auxiliares; 43 meses etapa de explotación y 4 meses de plan de cierre).

Debe realizarse un levantamiento del trazado propuesto con las elevaciones del terreno, y trazarse un perfil topográfico de la línea central de catenarias al momento de diseñar



cualquier tipo de teleférico (Durham, 1948) teniendo en consideración la complicidad del terreno en cuanto a los cambios abruptos de elevación y la distancia entre las estaciones de servicio del andarivel según lo permita el terreno.

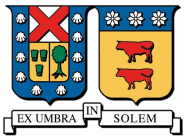
## 5.2 Trabajo en terreno

Para este estudio fue necesario realizar una captura de datos en terreno, en concreto se recorrió la ruta planificada anteriormente la cual sería destinada para el transporte de carga mediante el uso de camiones, a lo largo de la ruta se obtuvieron distintas mediciones de puntos haciendo uso del dispositivo GPS *Trimble Juno 3D* (ver **Figura 11**) el cual opera con una precisión de +/- 5 metros utilizando el Datum de geolocalización SIRGAS WGS 84.



*Figura 11: Dispositivo GPS Serie Juno (Manual de usuario Trimble).*

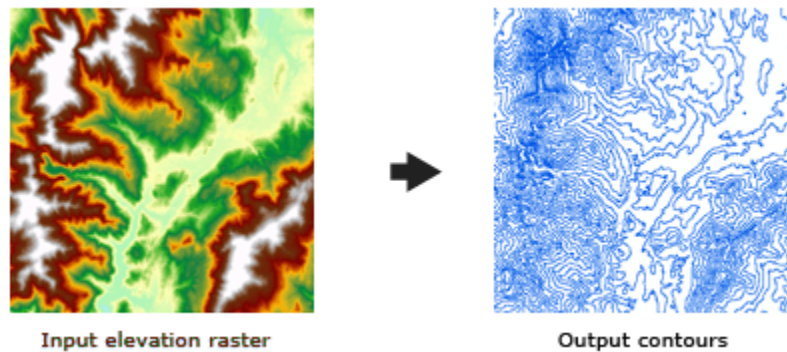
El trabajo en terreno fue realizado y posteriormente replanteado de acuerdo a los resultados que arrojaron los subsecuentes trazados de perfil topográfico del terreno.



### 5.3 Curvas de nivel

La metodología para la realización del levantamiento de punto topográficos constó de la combinación del trabajo en terreno con trabajo de investigación y uso de herramientas de análisis espacial y georreferenciación.

Las curvas de nivel son líneas que unen puntos con el mismo valor dentro de un conjunto de datos ráster, el cual representa fenómenos continuos como la elevación, la temperatura, la precipitación, la contaminación o la presión atmosférica. (ESRI, 2024) dispuestos para visualización y entendimiento efectivos (ver **Figura 12**).

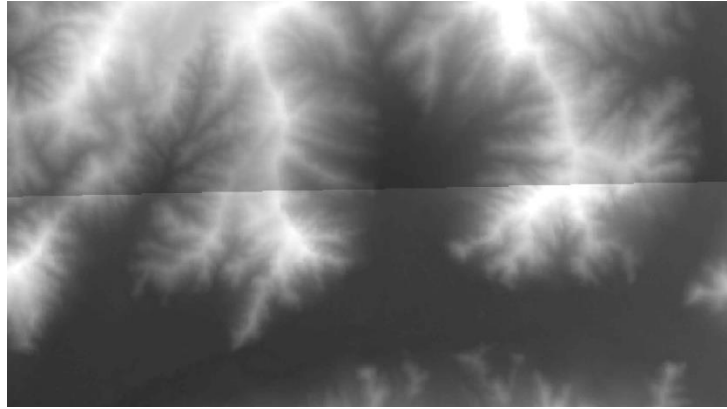
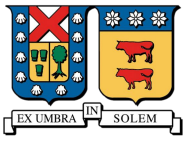


*Figura 12: Esquema de conversión de ráster a curvas de nivel (ESRI, 2024).*

A partir de imágenes satelitales SRTM de uso libre y software de Sistemas de información Geográfica (SIG) se generaron las curvas de nivel de la ubicación del yacimiento ubicado en la comuna de Alhué.

#### 5.3.1 Imágenes SRTM

Las imágenes SRTM de datos ráster fueron obtenidas del portal EarthData perteneciente a la Nasa ubicando las coordenadas del polígono de datos Ráster que contienen la ubicación específica del yacimiento. En la **Figura 13** se puede observar la visualización del ráster a través del software ArcMap de ArcGIS.



*Figura 13: Imagen SRTM de la zona de trabajo (Nasa, 2024).*

Con los datos de elevación contenidos en la imagen satelital SRTM se pueden generar las curvas de nivel del sector de interés.

### **5.3.2 ArcGIS ArcMap**

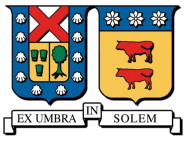
Para el desarrollo de las curvas de nivel y planos topográficos necesarios, además de la localización de los elementos del proyecto se trabajó con el software ArcMap en su versión 10.8.2, el cual es parte del sistema ArcGIS desarrollado por ESRI, es un software de Sistemas de Información Geográfica (SIG) diseñado para visualizar, analizar, editar y gestionar datos espaciales.

## **5.4 Planimetría conceptual**

### **5.4.1 Autodesk AutoCAD**

Para el desarrollo de los planos topográficos conceptuales del proyecto de andarivel se hizo uso del software AutoCAD, el cual es una herramienta ampliamente utilizada en la elaboración de planimetría.

A partir de las curvas de nivel generadas en ArcMap se realizan planos topográficos donde se presentan las ubicaciones tentativas para de lo que serían los elementos del sistema del andarivel.



## **5.4.2 Cambio de DATUM**

En Chile, el DATUM utilizado por Sernageomin corresponde al PSAD56, sin embargo, como el trabajo en terreno se realizó con un GPS que opera con otro Datum más actual, fue necesario transponer las coordenadas trabajadas en el proyecto para estar de acuerdo con la normativa del ente regulador, de tal forma replanteando cada punto del sistema coordenado al Datum PSAD56.

## **5.5 Transporte por camiones**

### **5.5.1 Carga por camión**

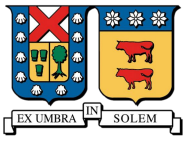
Se considera en el proyecto un camión tolva con una capacidad de 12 metros cúbicos, con el cual se estima una carga en un rango de 15 a 20 toneladas de mineral por viaje desde la zona de acopio en la mina hasta su destino.

### **5.5.2 Velocidad media de transporte**

Para el cálculo de tiempo de viajes se considera una velocidad media de 20 km/h para el transporte de carga dentro del recinto de la viña, por motivos de seguridad y condición del terreno no pavimentado.

### **5.5.3 Viajes por día**

Para mantener la producción planificada de 150 toneladas de mineral por día (ver sección 4.5) y la capacidad de carga del camión (ver sección 5.5.1) se requiere realizar entre 8 y 10 viajes para transporte de mineral. Considerando los viajes de retorno del camión se tiene un tránsito de por lo menos 16 viajes por día a través del viñedo particular.



#### 5.5.4 Potencia media por camión

Para el motor del tipo de camión propuesto en el proyecto original se considera una potencia media en el rango de 225 y 330 kW para este tipo de terrenos con pendiente (catálogo Renault Trucks, 2016). Para efectos de cálculo se considera un 70% de esta potencia.

### 5.6 Transporte por andarivel

#### 5.6.1 Tipo de sistema

En base a los antecedentes estudiados sobre los requerimientos de producción, distancia entre mina-carretera y las condiciones de relieve se estima aceptable la implementación de un sistema de andarivel de tipo **monocable** contemplando el emplazamiento de 17 torres y 2 estaciones terminales para la carga y descarga de mineral, distribuidas a lo largo de la ladera del cerro desde el sector de operaciones mina hasta la convergencia con la carretera G-692.

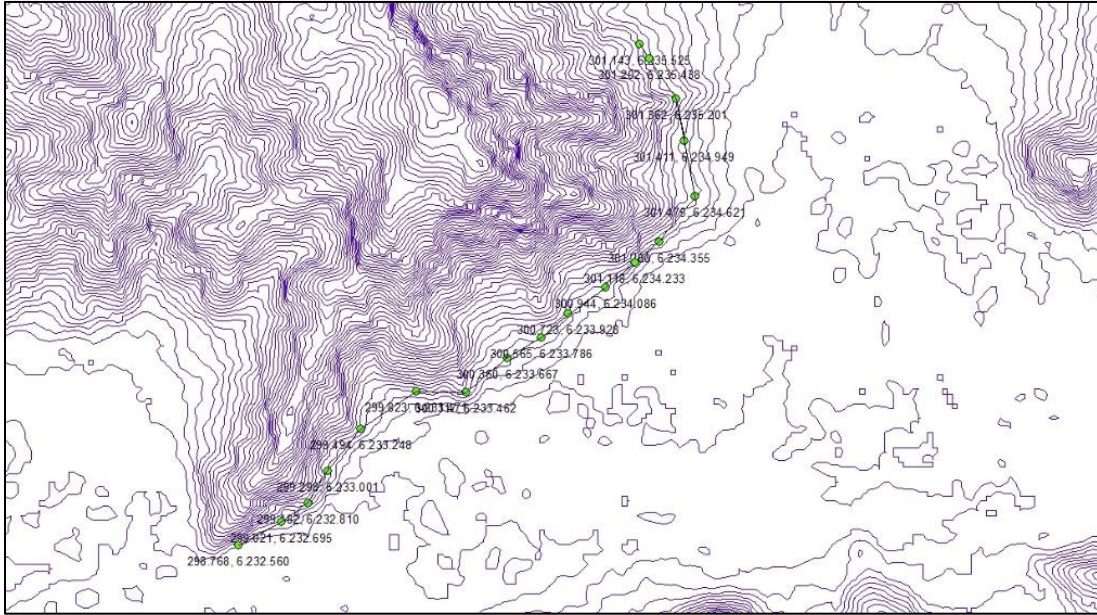
#### 5.6.2 Turnos de trabajo efectivo

Según lo definido en el proyecto original de la minera, se solicita que los trabajos en la mina se realicen en un solo turno de día, considerándose turnos de lunes a viernes, en horario de 08:00 a 18:00 horas, con un periodo de colación de 1 hora.

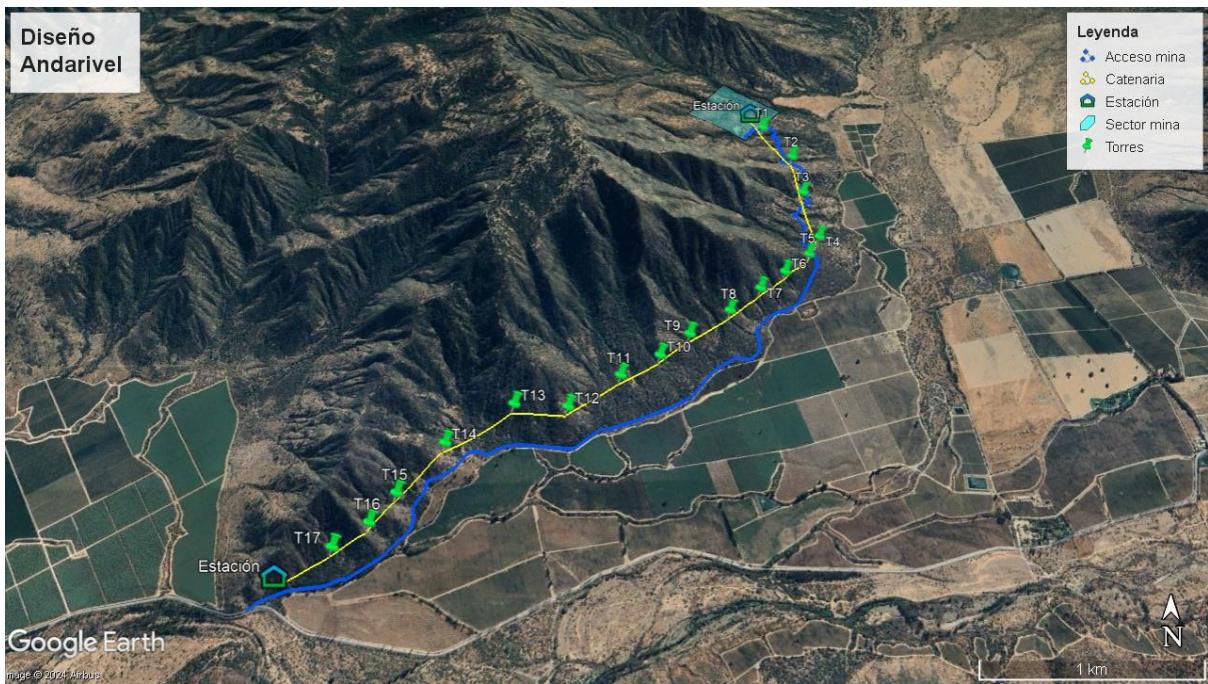
Con ello se estiman turnos de trabajo efectivo de 9 horas para la planificación.

#### 5.6.3 Trazado óptimo

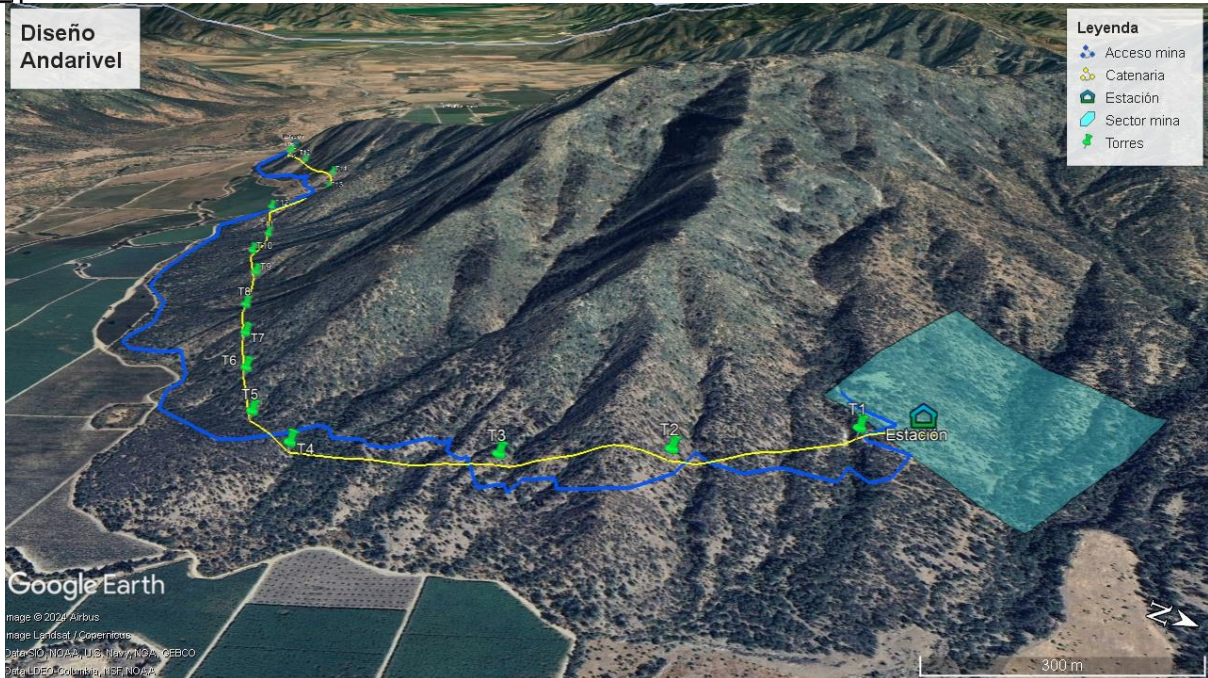
Considerando los parámetros de condición de relieve se definió el trazado expuesto en las **Figuras 14, 15 y 16**.



**Figura 14:** Visualización del trazado de catenarias en ArcMap.



**Figura 15:** Vista general A.



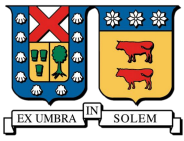
**Figura 16:** Vista general B.

#### 5.6.4 Ubicación de las obras

Se definió para propósitos del proyecto la numeración de las torres desde el 1 al 17 comenzando desde la estación de carga ubicada en el sector de las operaciones de la mina. En la **Tabla 4** se observan las coordenadas UTM proyectadas y elevación de cada estación y torre que forma parte del sistema propuesto.

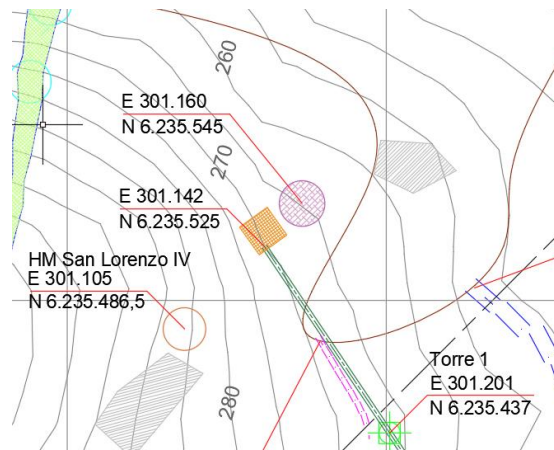
**Tabla 5:** Coordenadas UTM Según Datum PSAD56 y ZONA 19 Sur.

Elemento	N	E	Base, msnm	Alto estructura, m
<b>Estación carga</b>	6.235.525	301.143	270	2
<b>Torre 1</b>	6.235.438	301.202	265	6
<b>Torre 2</b>	6.235.201	301.362	263	7
<b>Torre 3</b>	6.234.949	301.411	216	12
<b>Torre 4</b>	6.234.621	301.475	213	9
<b>Torre 5</b>	6.234.489	301.405	203	14
<b>Torre 6</b>	6.234.355	301.260	202	14
<b>Torre 7</b>	6.234.234	301.118	198	17
<b>Torre 8</b>	6.234.086	300.944	200	15
<b>Torre 9</b>	6.233.928	300.723	199	16
<b>Torre 10</b>	6.233.786	300.566	200	14

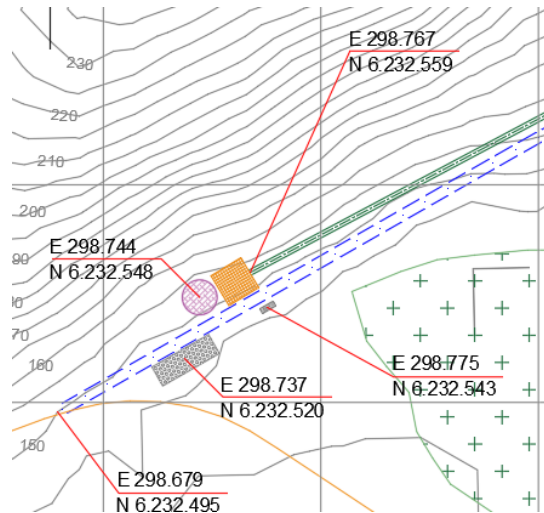
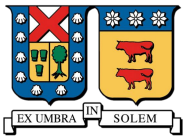


<b>Torre 11</b>	6.233.667	300.361	196	18
<b>Torre 12</b>	6.233.465	300.096	205	7
<b>Torre 13</b>	6.233.471	299.823	195	17
<b>Torre 14</b>	6.233.248	299.494	200	8
<b>Torre 15</b>	6.232.971	299.289	200	8
<b>Torre 16</b>	6.232.810	299.182	195	7
<b>Torre 17</b>	6.232.695	299.021	165	12
<b>Estación descarga</b>	6.232.560	298.768	153	2

También se consideró el emplazamiento de instalaciones anexas al sistema de andarivel, en las **Figuras 17 y 18** se observan las obras destinadas particularmente a zonas de acopio, baños para el personal y zona de maniobras para los camiones en la estación base o de descarga de material.



**Figura 17:** zona de acopio (rosa) en el sector de operaciones mina.



*Figura 18: Patio de maniobras (gris), baños y zona de acopio en el sector de descarga.*

### 5.6.5 Tramos del trazado

El diseño preliminar dio lugar a la existencia de 18 tramos de catenarias, cada tramo considerado como trazado de cable colgante entre dos torres contiguas. En la **Tabla 5** se desglosan los parámetros de diseño para cada uno de dichos tramos, siendo numerados de acuerdo con el sentido de movimiento de la carga desde el sector mina.

*Tabla 6: Parámetros de diseño en cada tramos de catenaria.*

Tramos	Longitud cable, m	Pendiente catenarias	Largo acumulado, m	Cambio de ángulo, grados	Flecha, m
Tramo 1 (cima)	105	-1%	105	-	0,5
Tramo 2	286	-0,4%	391	0	3,7
Tramo 3	260	-16%	651	23	3,1
Tramo 4	335	-2%	986	0	5,1
Tramo 5	149	-3%	1.135	39	1,0
Tramo 6	198	-1%	1.333	19	1,8
Tramo 7	187	-1%	1.520	0	1,6
Tramo 8	228	0%	1.747	0	2,3
Tramo 9	272	0%	2.019	5	3,3
Tramo 10	212	-0,5%	2.231	7	2,0
Tramo 11	237	0%	2.468	12	2,5
Tramo 12	333	-1%	2.801	7	5,0
Tramo 13	274	0%	3.075	39	3,4



<b>Tramo 14</b>	397	-1%	3.471	36	7,1
<b>Tramo 15</b>	345	0%	3.817	19	5,4
<b>Tramo 16</b>	193	-3%	4.010	3	1,7
<b>Tramo 17</b>	200	-13%	4.210	21	1,8
<b>tramo 18 (base)</b>	288	-8%	4.497	8	3,8

El cambio de ángulo representa el desvío horizontal del sistema, donde un valor superior a los  $0,5^\circ$  requerirá una modificación a la torre para realizar un cambio de trayectoria de forma segura (EMSD, 2018) y ángulos que sobrepasen los 30 grados deberán contemplar una estación de cambio de ángulo.

## 5.7 Parámetros operacionales

### 5.7.1 Tipo de cables

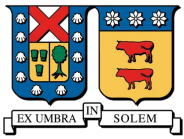
Según lo descrito, para el diseño preliminar se consideró el uso de cables de acero trenzado de diámetro 29 milímetros (1 1/8 pulg.), con un peso de 4,9 kg/m (3,3 libra/pie) y opera de forma segura con una carga de trabajo de hasta 226 kN (50.000 libras fuerza) considerando los requerimientos de producción, espaciamiento entre torres y largo total del trayecto de catenarias del sistema propuesto.

### 5.7.2 Carga en el circuito

Considerando los requerimientos de producción de la mina, en la **Tabla 6** se presentan los cálculos de parámetros operacionales relacionados con las cargas en circulación en el sistema.

*Tabla 7: Parámetros operacionales del circuito.*

<b>Parámetro</b>	<b>Cantidad</b>	<b>unidad</b>
<b>Intervalo entre baldes</b>	78,4	s
<b>Espaciamiento entre baldes</b>	159	m
<b>baldes por recorrido</b>	28	un
<b>baldes totales</b>	56	un
<b>Carga total mineral por recorrido</b>	10,1	ton
<b>Carga total circulando</b>	19,6	ton
<b>Tiempo viaje carga (tramo)</b>	37,5	min



<b>Tiempo de ciclo para un balde</b>	75	min
--------------------------------------	----	-----

Por tanto, se estima la realización de 15 recorridos diarios para mantener la producción esperada, la cual se llevaría a cabo mediante la descarga de alrededor de 400 baldadas de mineral por día.

### 5.7.3 Tensión requerida en el sistema

Considerando los parámetros de diseño y mediante las ecuaciones (4), (5) y (6) se obtuvo la tensión mínima requerida en el sistema de catenarias para su funcionamiento mecánico dispuesto en la **Tabla 7**.

*Tabla 8: Tensión en el cable en cada tramo del circuito.*

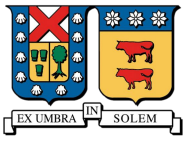
<b>Parámetros operacionales</b>	<b>Tensión, kN</b>
<b>Tramos en descenso</b>	2,2
<b>Tramos en ascenso</b>	12,3
<b>Contrapeso</b>	133,4
<b>Tensión mínima en el cable</b>	147,9

Para obtener un valor aceptable de flecha considerando el relieve bajo el trayecto de las catenarias, se contempló aumentar el valor de la tensión en el cable un contrapeso colgante en la estación de descarga además de la posibilidad de agregar tensión extra mediante una polea motriz anclada en la misma estación.

### 5.7.4 Potencia calculada

Mediante la diferencia entre las ecuaciones (7) y (8) se pudo estimar que el sistema en su configuración establecida requiere la incorporación de energía mecánica para su funcionamiento debido particularmente a que las pendientes no son lo suficientemente pronunciadas frente a la amplitud del trazado.

Luego la potencia que se requiere inyectar al sistema se calculó mediante el desarrollo de la ecuación (9) por tanto se requiere.



$$P_{requerida} = 6,1 \text{ kW}$$

Traduciendo a términos prácticos, un motor capaz de generar una potencia de 6,1 kW es equivalente a un pequeño motor de gasolina de cuatro tiempos, un motor diésel compacto, o un motor eléctrico de potencia equivalente.

### 5.7.5 Energía diaria para mover el sistema

A partir de la potencia requerida para transportar la carga en ambos sistemas, con la ecuación (10) se calcula la energía diaria requerida para transportar el mineral en el ritmo de producción esperado.

- **Transporte mediante camión:**

Considerando 16 y 20 viajes al día entre idas y vueltas, con una duración estimada de 10 minutos y 30 segundos en cada una se tiene:

$$E_{mín_{camión}} = 441 \text{ kWh}$$

$$E_{máx_{camión}} = 551 \text{ kWh}$$

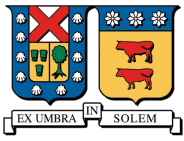
- **Transporte mediante andarivel:**

Considerando operación continua durante todo el turno de trabajo (9 horas al día) se tiene:

$$E_{andarivel} = 54,8 \text{ kWh}$$

### 5.7.6 Levantamiento de polvo

Se obtienen los siguientes resultados para el levantamiento de polvo producido con la aplicación de las ecuaciones (11) y (12).



- Transporte con camión:

$$fe = 760,9 \left(\frac{g}{km}\right)$$

Considerando la distancia de 3,5 kilómetros que cruza el interior de la viña, se levanta una masa de 2,7 kg de material particulado por viaje transitado.

- Transporte de camioneta para movilización de personal:

$$fe = 169,5 \left(\frac{g}{km}\right)$$

Considerando la distancia de 4,9 kilómetros que bordea el recinto de la viña, se levanta una masa de 0,8 kg de material particulado por viaje transitado.

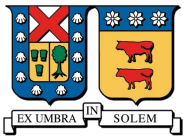
### 5.7.7 Caminos y senderos auxiliares

En la sección Anexo B se observan los planos que indican el camino de acceso de la mina en conjunto con los senderos provisionarios para la construcción del sistema de andarivel.

*Tabla 9: Dimensionamiento de caminos y senderos.*

<b>Caminos</b>	<b>Longitud total, m</b>	<b>Ancho, m</b>
<b>Camino acceso mina</b>	4.900	5
<b>Senderos provisionarios</b>	4.729	2,5

El desglose de las distancias para los senderos auxiliares se muestra en la **Tabla 8**, el relieve fue un factor determinante que provocó la variación de longitudes para algunos segmentos, además de la cantidad de estructuras a las que están asociados.



*Tabla 10: Longitudes de senderos auxiliares destinados a las obras.*

Senderos auxiliares (estructura dedicada)	Distancia, metros
1 (estación carga)	28
2 (torre1)	50
3 (torre 2)	332
4 (torre3)	90
5 (torre4)	80
6 (torre 5)	85
7 (torre 6 y 7)	524
8 ( torres 8, 9 y 10)	1.125
9 (torres 11 y 12)	930
10 (torres 13 y 14)	610
11 ( torre 15)	470
12 ( torre 16 y 17)	405
Total	4.729

### 5.7.8 Planos topográficos

El diseño final con sus respectivos planos se puede observar en la sección **Anexo B**. Se incorpora un plano general del recorrido del sistema y cada vista de detalle en escalas variables.

### 5.7.9 Perfiles topográficos

A partir del diseño elaborado se presentan los perfiles topográficos elaborados en ArcMap correspondientes a cada uno de los 18 tramos de catenarias para el sistema de andarivel propuesto.

Los siguientes diagramas toman en consideración la flecha calculada a mediante la ecuación (3) con motivo de demostrar una representación del sistema considerando dicho parámetro. El resto de los tramos se presenta en la sección Anexos (ver **Anexo A**).

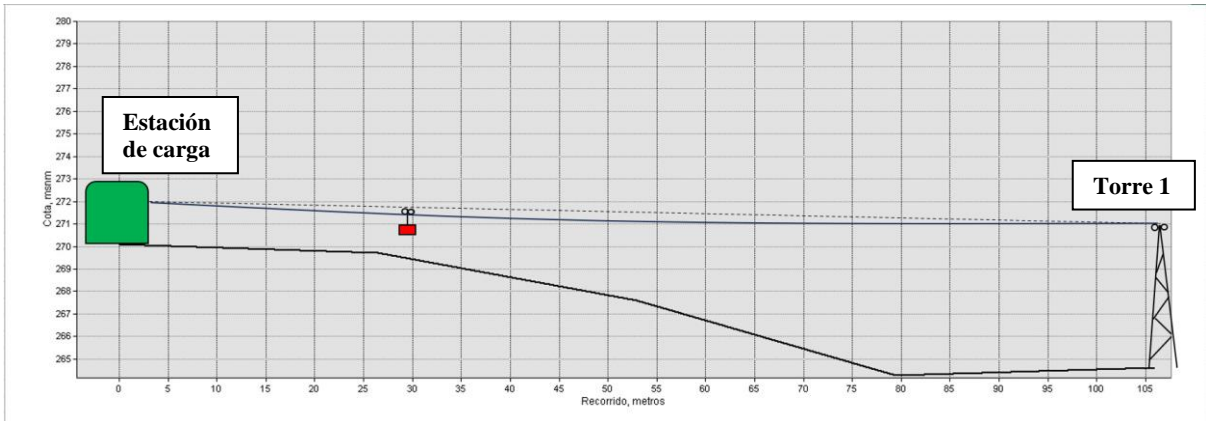


Figura 19: Tramo 1 (inicial).

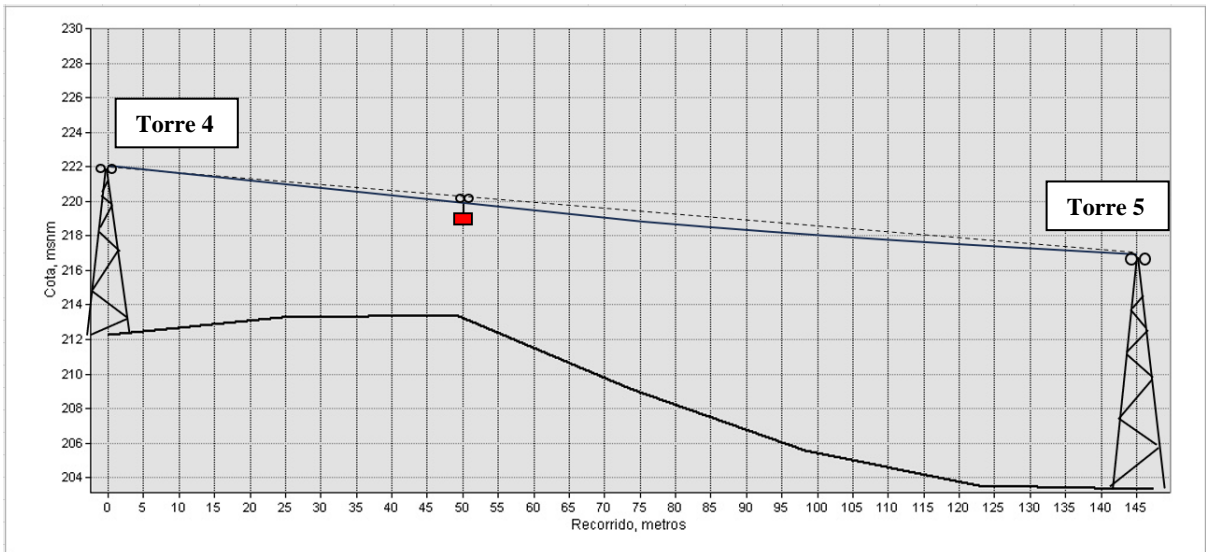


Figura 20: Tramo 5.

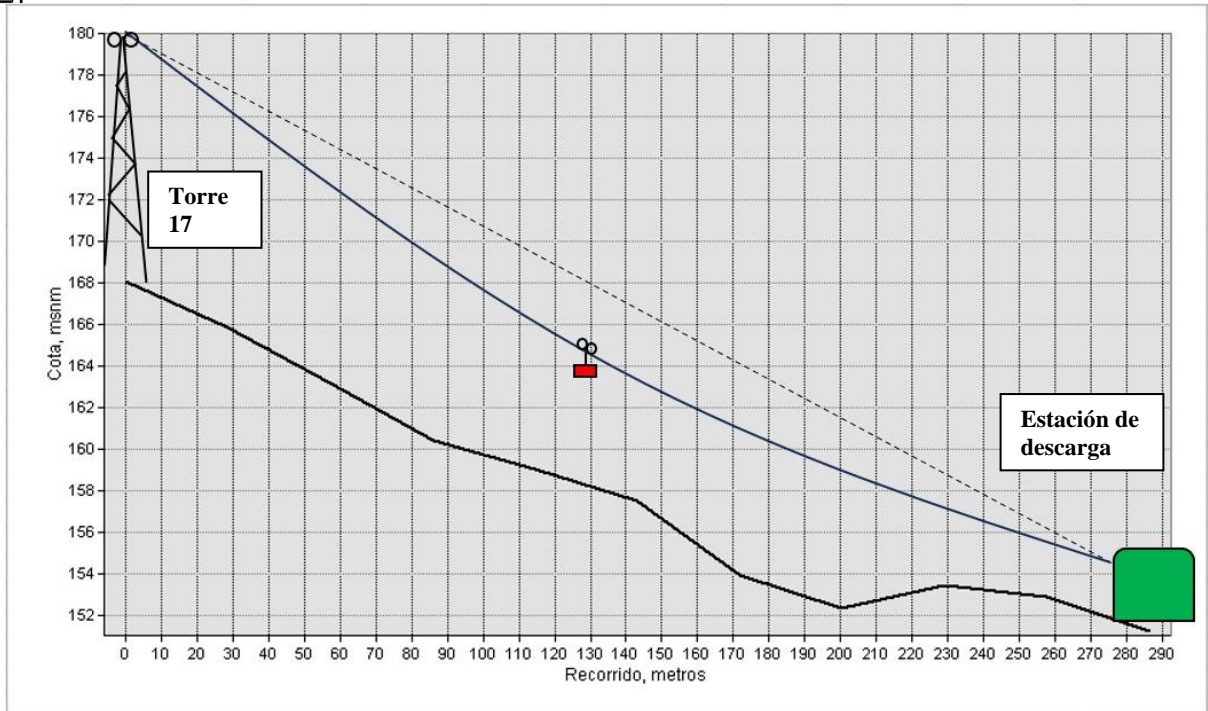


Figura 21: Tramo 18 (final).

## 6 Resultados

### 6.1 Resumen de rendimiento del sistema

En la **Tabla 11** se presentan los resultados comparables entre el sistema de transporte original mediante camiones diésel y el sistema propuesto de andarivel.

Tabla 11: Principales parámetros de rendimiento entre ambos tipos de transporte.

criterio	Transporte Convencional (Camiones Diésel)	Sistema de Andarivel
Número de viajes diarios	16 a 20	≈ 400 descargas de balde



---

<b>Producción</b>	150 tpd	150 tpd
-------------------	---------	---------

---

<b>Flota</b>	1 camión	56 baldes circulando
--------------	----------	----------------------

---

<b>Potencia del sistema</b>	sobre 158 kW	6,1 kW
-----------------------------	--------------	--------

---

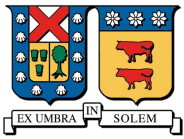
<b>Requerimiento energético diario</b>	441 kWh - 551 kWh	54,8 kWh
----------------------------------------	-------------------	----------

---

Se observa que el sistema alternativo mediante andarivel implica en primera instancia un rango de entre el 10% y 12,4% del consumo energético diario en comparación con el uso de transporte convencional con camión.

## 6.2 Impacto ambiental

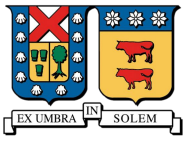
El impacto ambiental provocado por el sistema de andarivel presenta diferencias en cuanto al impacto generado por sistemas de transporte convencional que se desea sustituir en la planificación del proyecto. En cuanto a la suspensión de material particulado se obtiene una reducción del 77,7% de gramos de polvo por kilómetro recorrido considerando sólo el uso de camionetas para la movilización de personal, lo cual ocurre sólo 2 veces al día, frente al tránsito constante de camiones que movilizan personal y carga mineral, cuyos viajes diarios proyectan una emisión de material particulado en el rango de 43 kg a 53 kg por día dentro del recinto de la viña.



En la **Tabla 12** se muestra un cuadro comparativo cualitativo entre ambas tecnologías.

*Tabla 12: Impacto ambiental entre ambos tipos de transporte.*

<b>Criterio</b>	<b>Transporte Convencional (Camiones Diésel)</b>	<b>Sistema de Andarivel</b>
<b>Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI)</b>	Altas emisiones de CO <sub>2</sub> y otros gases contaminantes debido a la combustión diésel.	Emisiones prácticamente nulas en operación, ya que el andarivel generalmente se alimenta con electricidad.
<b>Contaminación del Aire</b>	Generan emisiones de partículas (PM) y óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> ), afectando la calidad del aire.	Mínima o inexistente, al no tener un motor de combustión interna liberando emisiones directas.
<b>Ruido</b>	Ruido elevado por motores, aceleración, frenado y vibraciones, afectando la fauna y el confort humano.	Ruido muy reducido, limitado principalmente al funcionamiento mecánico del sistema.
<b>Uso de Energía</b>	Dependencia de combustibles fósiles (diésel) con bajo rendimiento energético.	El consumo eléctrico puede provenir de fuentes más limpias (renovables), mejorando el desempeño energético.
<b>Impacto en el Paisaje y la Flora/Fauna</b>	Afectación del terreno debido a caminos transitados, ruido y polvo.	Menor huella en el terreno, las torres y cables ocupan menos espacio y provocan menor perturbación del entorno natural.
<b>Mantenimiento Ambiental</b>	Requiere gestión de residuos peligrosos (aceites, filtros, neumáticos) y emisiones constantes.	Mantenimiento principalmente mecánico y eléctrico, con menor generación de residuos peligrosos.



## 7 Conclusiones

Para el estudio de viabilidad del proyecto de andarivel de la mina San Lorenzo se consagró un diseño de transporte alternativo al uso de camiones convencionales diésel. Se evaluó la viabilidad técnica de un sistema monocable continuo capaz de mover la carga cerro abajo al ritmo de producción aproximado de 17 toneladas-hora de mineral siguiendo los estándares y procedimientos empíricos de diseño.

Las características locales del relieve proyectaron el emplazamiento de 17 torres de soporte entre las estaciones terminales del sistema cuya longitud de tramos alcanzan el orden de 4.500 metros en total, lo que se proyecta en el uso de un cable de acero trenzado de 29 milímetros de diámetro y aproximadamente 9.000 metros totales operando con una tensión mínima en el cable de 148 kN, cuyo valor puede ser ajustado posteriormente mediante contrapesos colgantes y la acción de la polea motriz.

Para su correcto funcionamiento, se calculó que el sistema requiere una potencia de 6,1kW la cual puede ser aportada por un pequeño motor eléctrico para transportar la carga descendente en cada momento dado a través de la circulación de 28 baldes cargados de mineral y 28 baldes sin carga aprovechando la energía gravitacional para ascender vuelta a la estación de carga. Lo que implica un costo energético de 54,8 kWh por día frente al requerimiento del transporte convencional de por lo menos 441 kWh diario.

Con lo anterior se estima que el requerimiento energético del sistema alternativo propuesto estará en un rango de 10% a 12,4% del requerimiento con uso de transporte convencional.

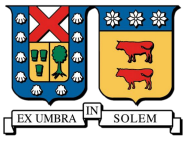
Debido a las diferencias estudiadas del impacto medioambiental entre el transporte convencional y las aplicaciones de sistemas de andarivel se concluye cualitativamente que existe una reducción considerable de emisiones de gases de efecto invernadero, ruido, levantamiento de polvo y accidentes ambientales.



## 8 Recomendaciones

Con base en los resultados y las conclusiones obtenidas en esta investigación, se plantean las siguientes recomendaciones para trabajos posteriores, enfocadas reducir las limitaciones relacionadas con el tema analizado:

- Hacer una evaluación económica con la implementación de ambos sistemas de transporte considerando las recomendaciones técnicas para un análisis comparativo más completo.
- Estimar cuantitativamente más parámetros de impacto ambiental provocado por la implementación de camiones diésel versus el impacto ambiental que generaría el sistema de andarivel.
- Profundizar el estudio con un enfoque en las obras civiles a realizar, tanto en la construcción de caminos y senderos, el diseño específico de las torres de soporte y la elaboración del plan de construcción del sistema.



## 9 Referencias

Edward B. Durham. (1948). *AERIAL TRAMWAYS AND CABLEWAYS. En MINING ENGINEERS' HANDBOOK*: Vol. II (THIRD).

Howard L. Hartman & Jan M. Mutmanský. (2002). *Introductory Mining Engineering* (Second Edition). John Wiley & Sons, Inc.

Electrical and Mechanical Services Department (with The Government of the Hong Kong Special Administrative Region). (2018). *Code of Practice on the Design, Manufacture and Installation of Aerial Ropeways* (2018 Edition).

Liedl, S., & International Organization for the Study of Transportation by Rope. (1999). *Motions and forces in the rope system of aerial ropeways during operation*. Internationaler Seilbahnkongress 1999, San Francisco, California.

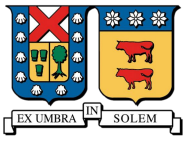
WALTER G. BOOTH. (1965). *THE DESIGN AND APPLICATION OF AERIAL ROPEWAYS* [Master]. McMaster University.

B. Alshalalfah, Amer Said Shalaby, Steven Dale, & Fadel Othman. (s. f.). Improvements and Innovations in Aerial Ropeway Transportation Technologies: Observations from Recent Implementations. *Journal of Transportation Engineering*.

Ministerio de Bienes Nacionales. (2010). *Manual de Normas Técnicas de Mensuras* (Segunda edición).

Hartman, H. (1992). *SME Mining Engineering Handbook* (2nd Edition, Vol. 1). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.

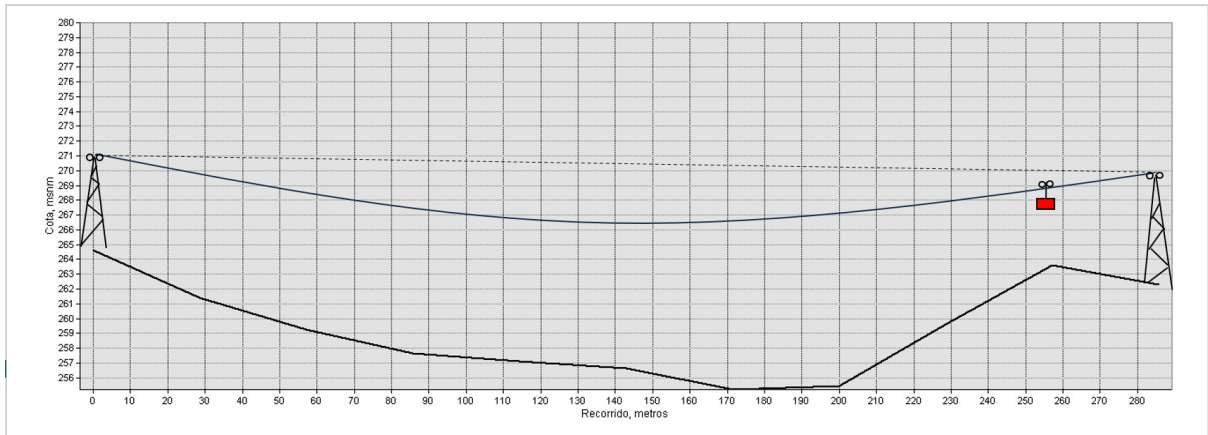
Seremi del Medio Ambiente. (2020). Capítulo 4 - Resuspensión por Tránsito de Vehículos. En *GUÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS EN LA REGIÓN METROPOLITANA*.



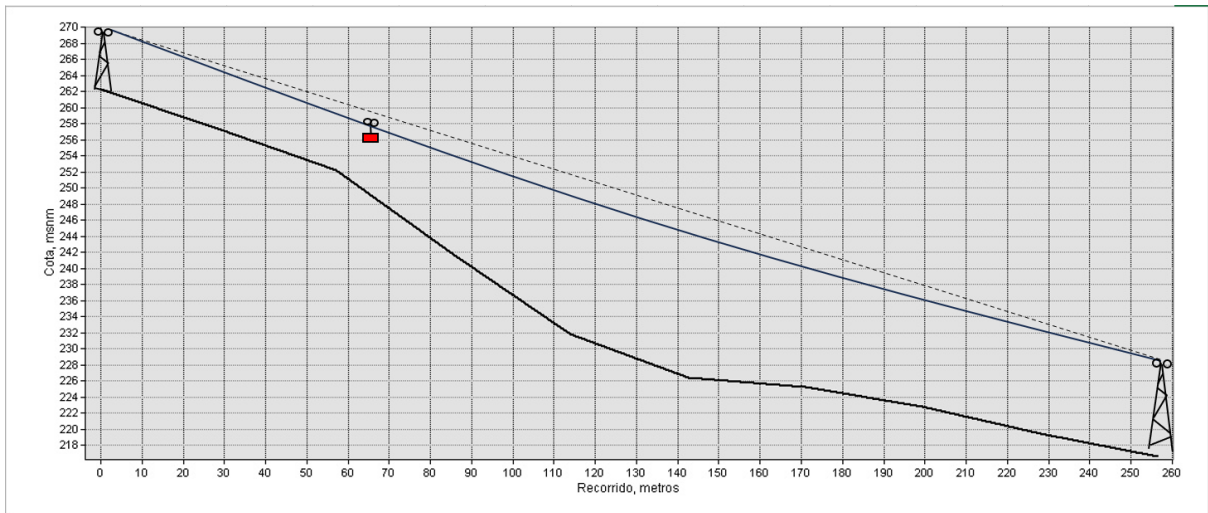
## 10 Anexos

### 10.1 Anexo A

- **Tramo 2**

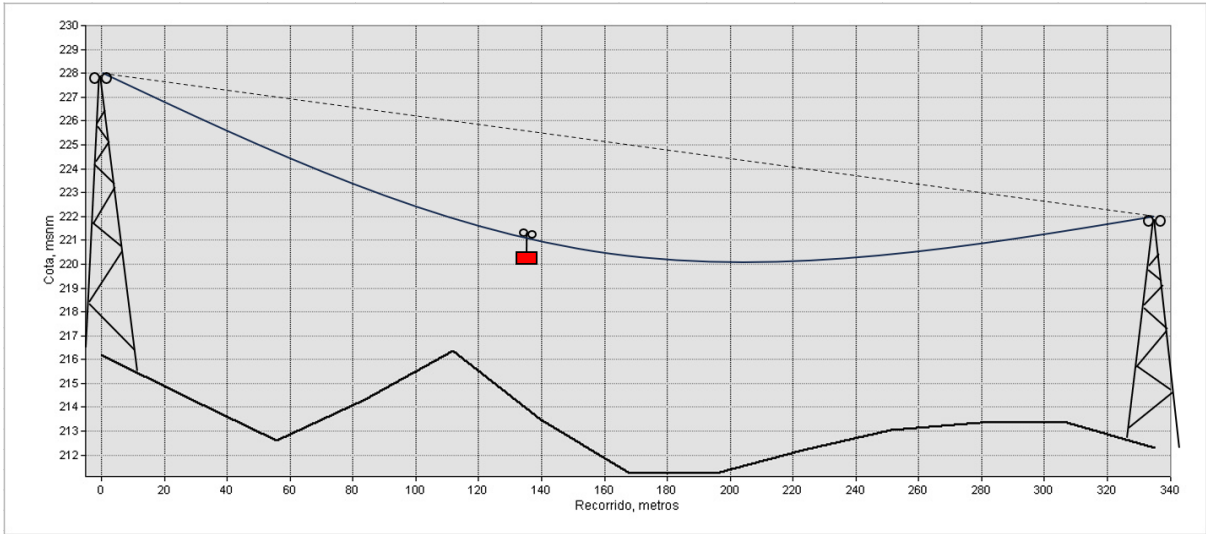


- **Tramo 3**

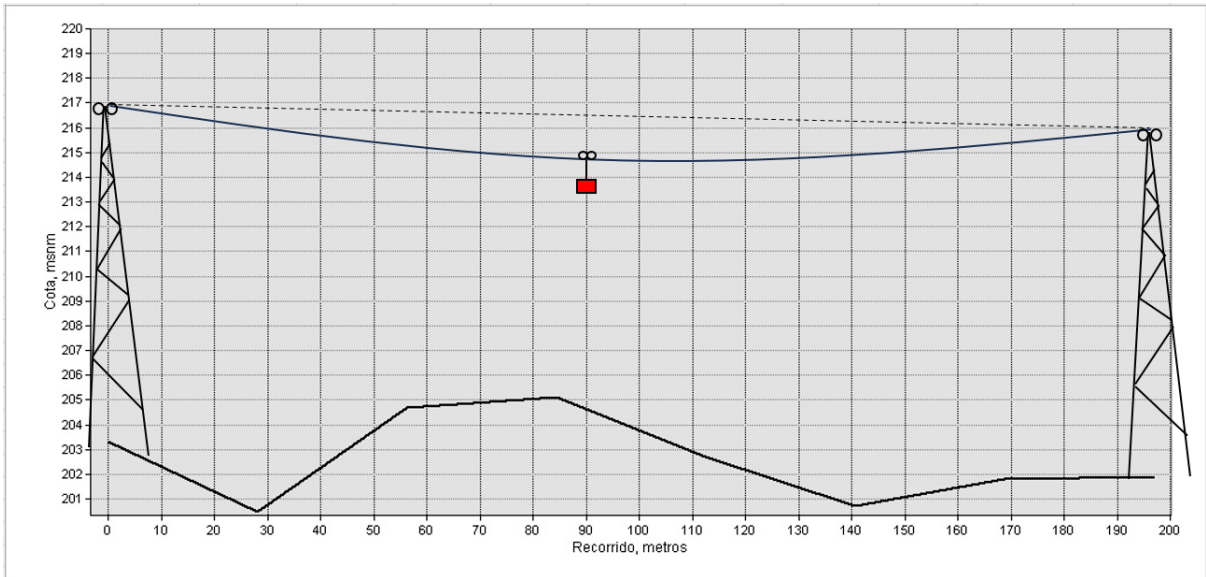


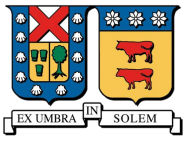


- **Tramo 4**

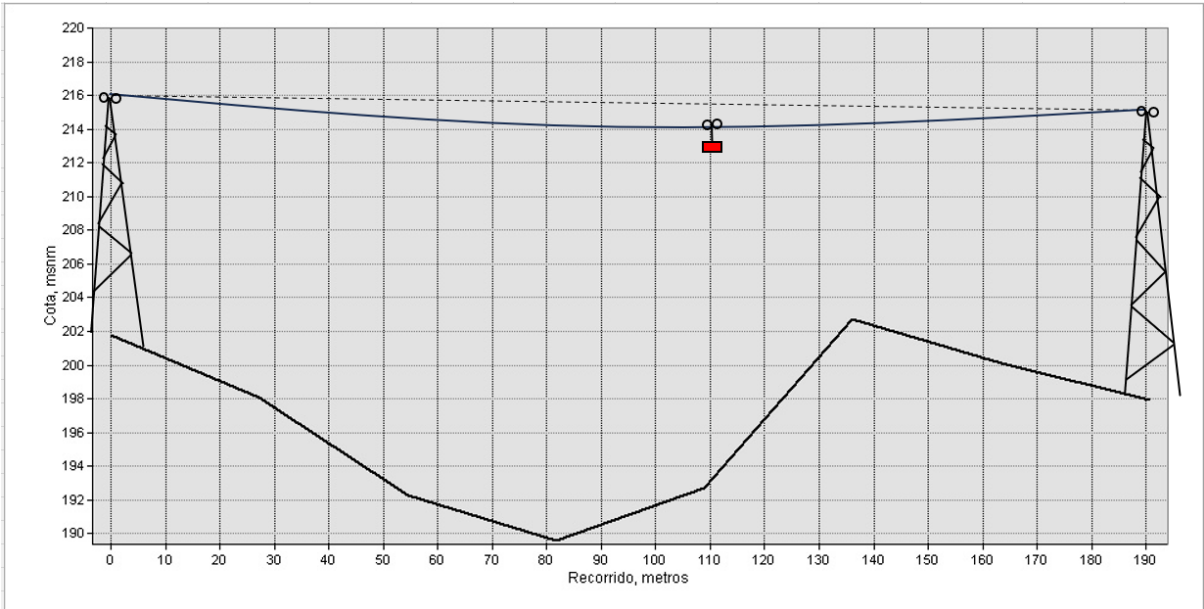


- **Tramo 6**

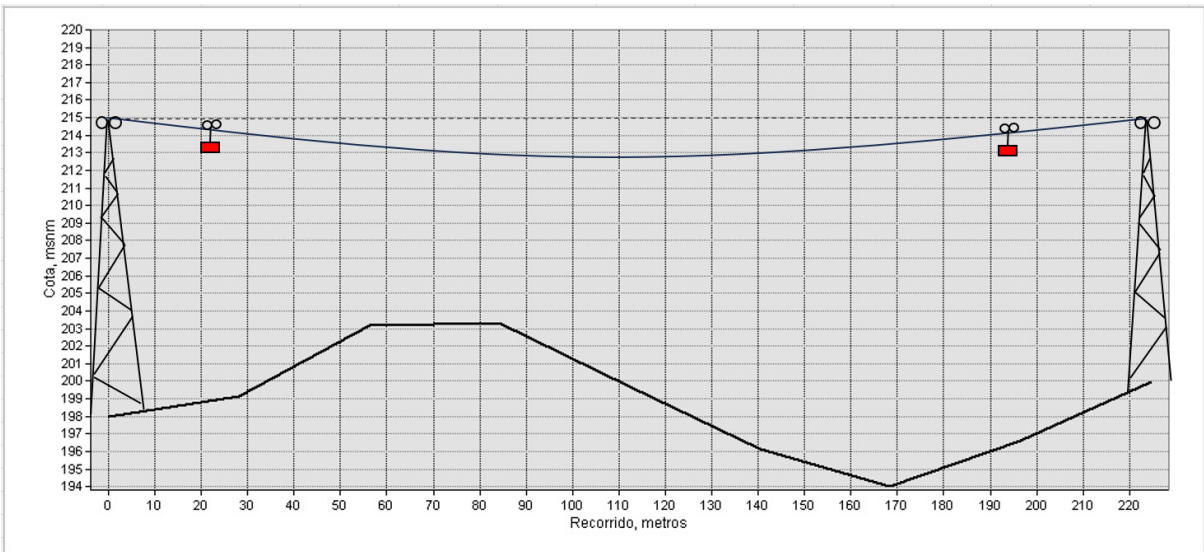




- **Tramo 7**

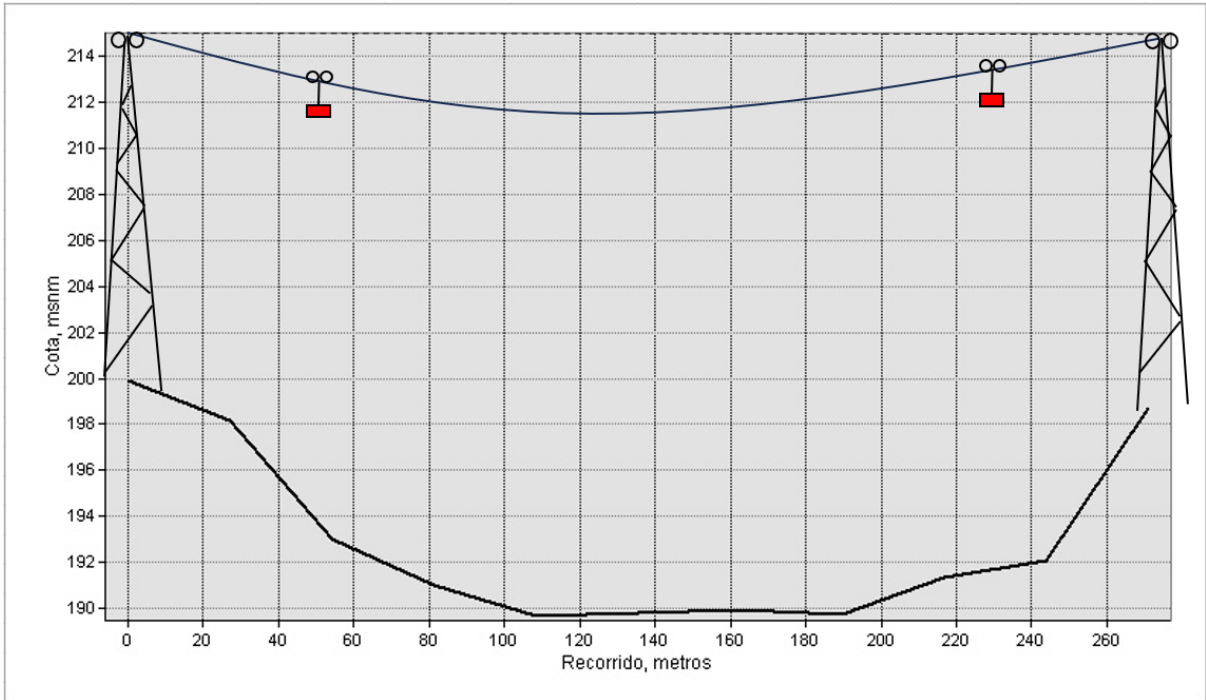


- **Tramo 8**

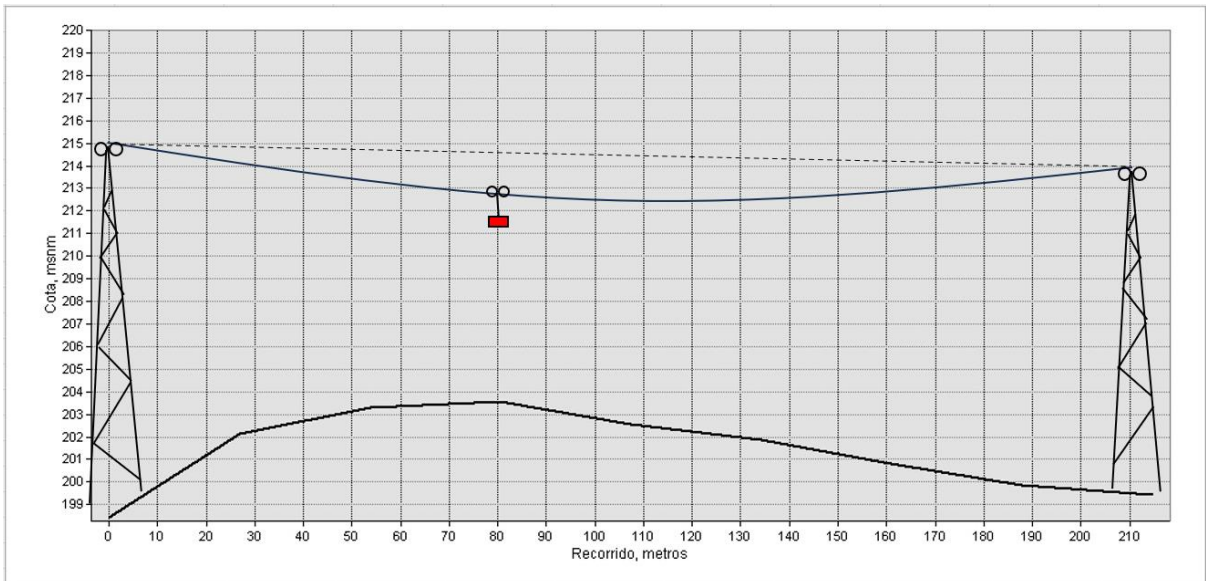




- **Tramo 9**

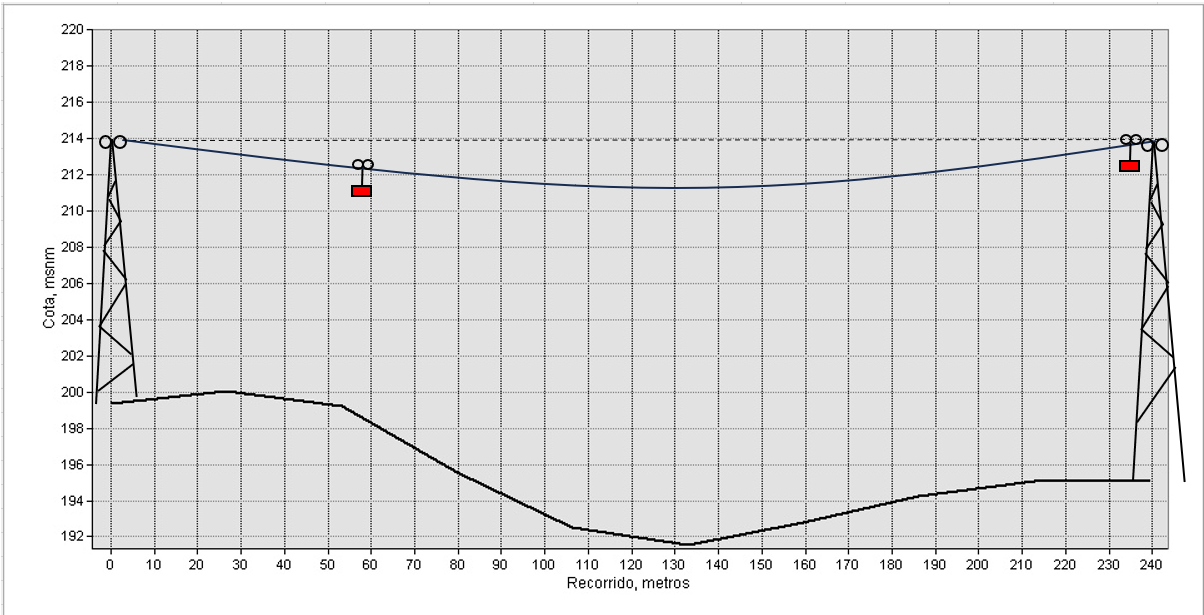


- **Tramo 10**

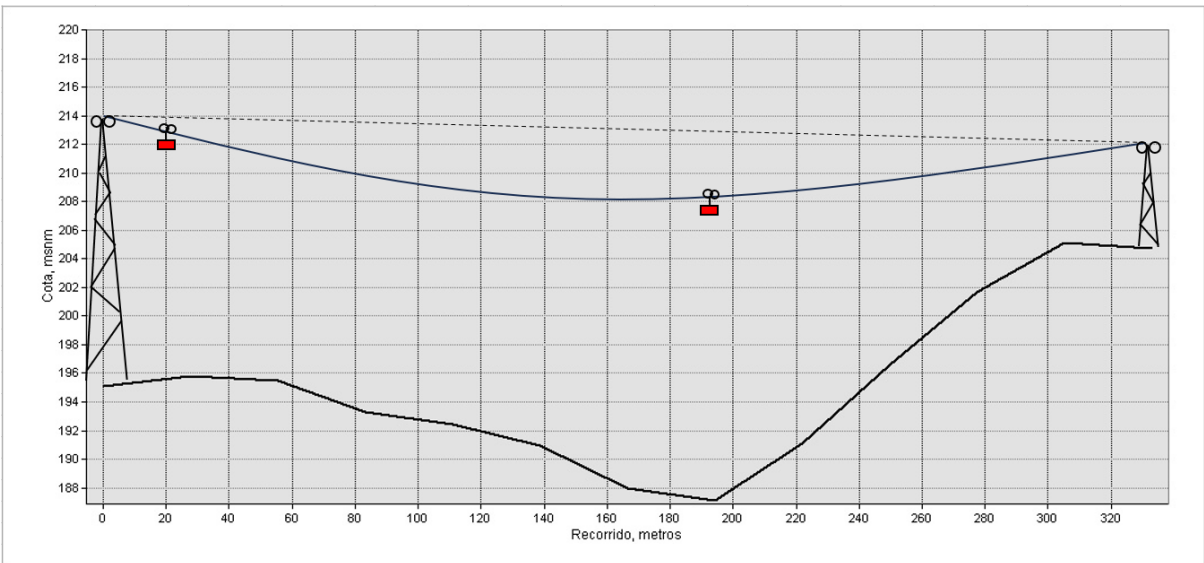


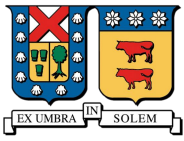


- **Tramo 11**

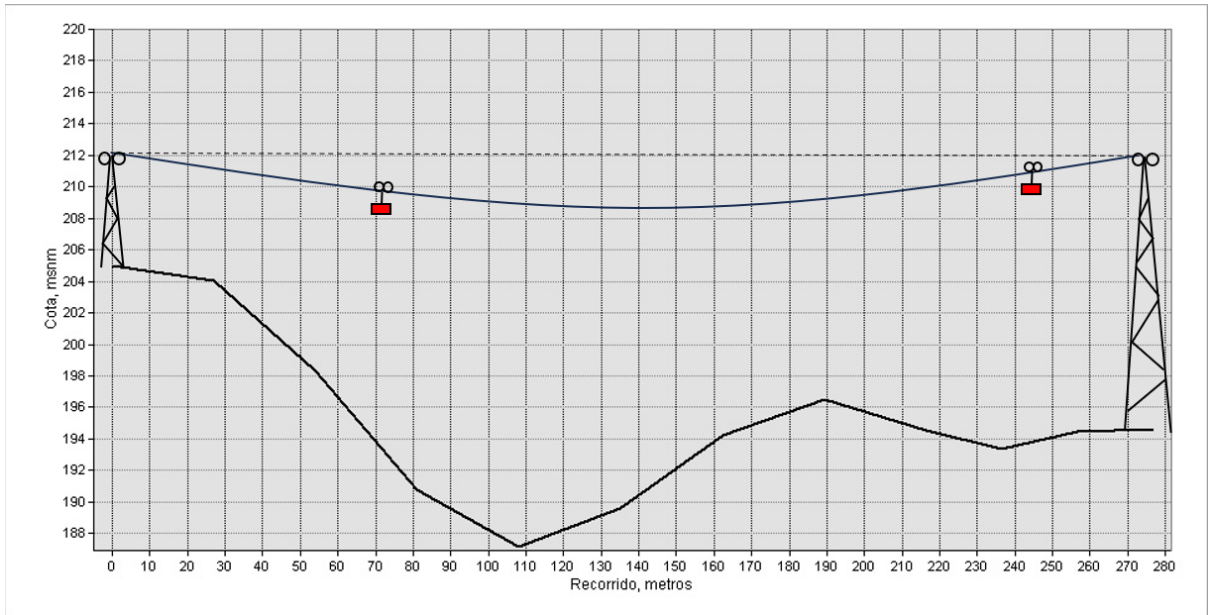


- **Tramo 12**

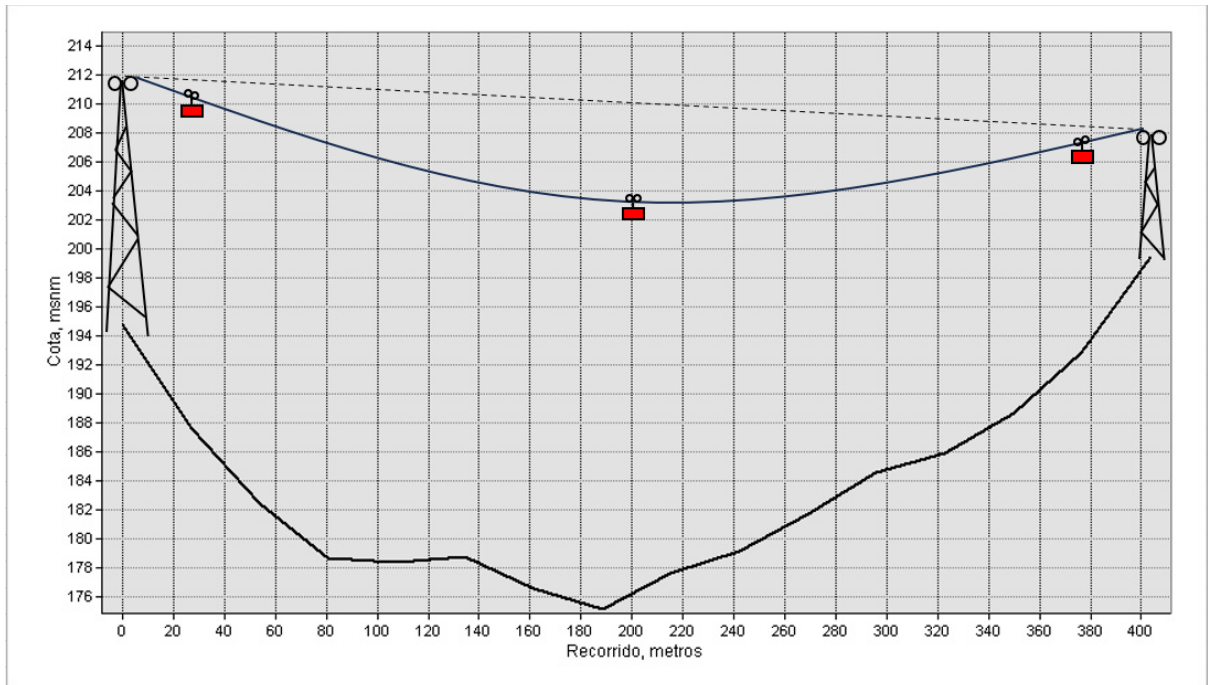


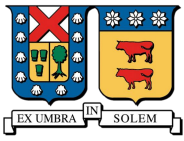


- **Tramo 13**

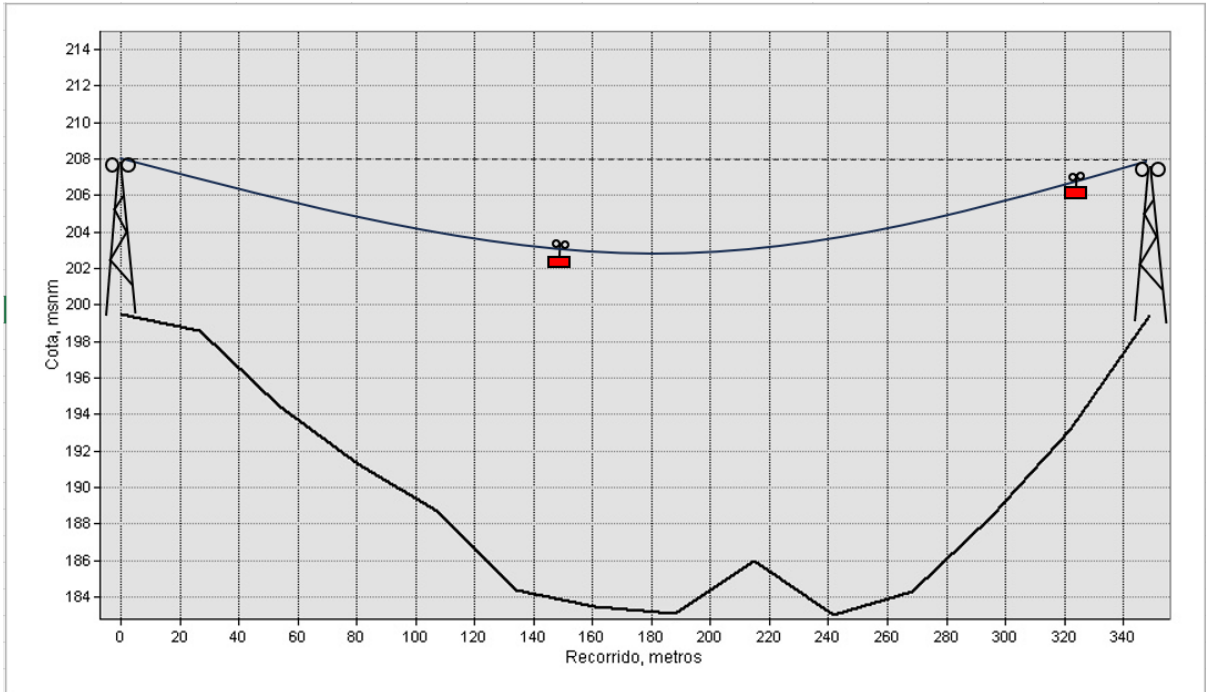


- **Tramo 14**

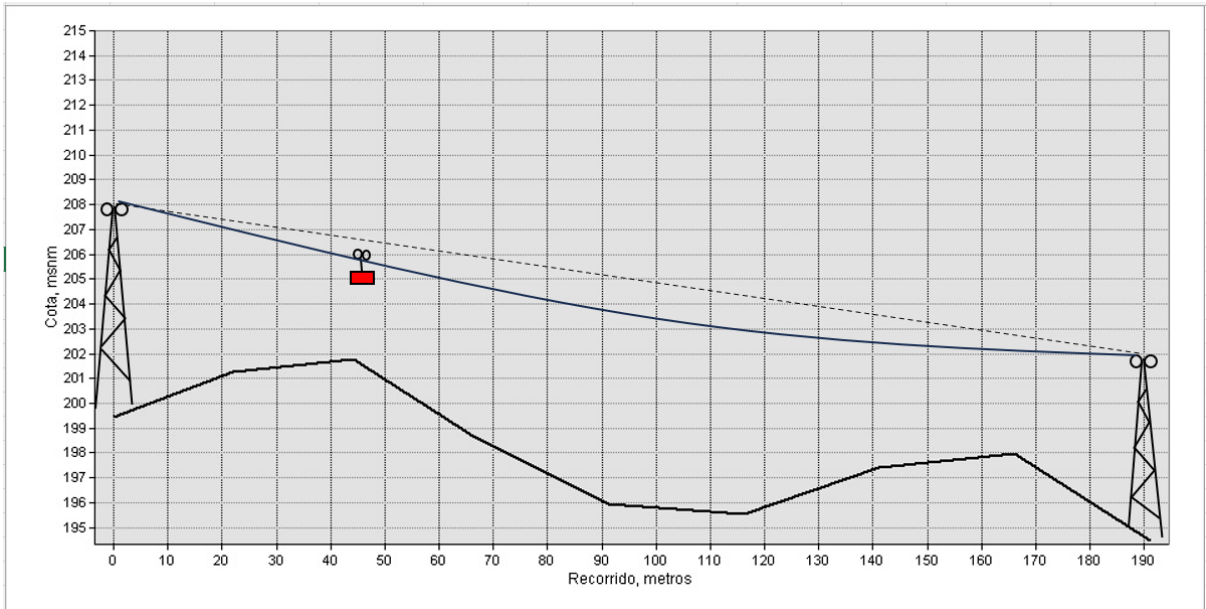


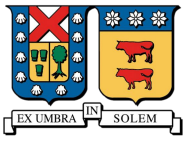


- **Tramo 15**

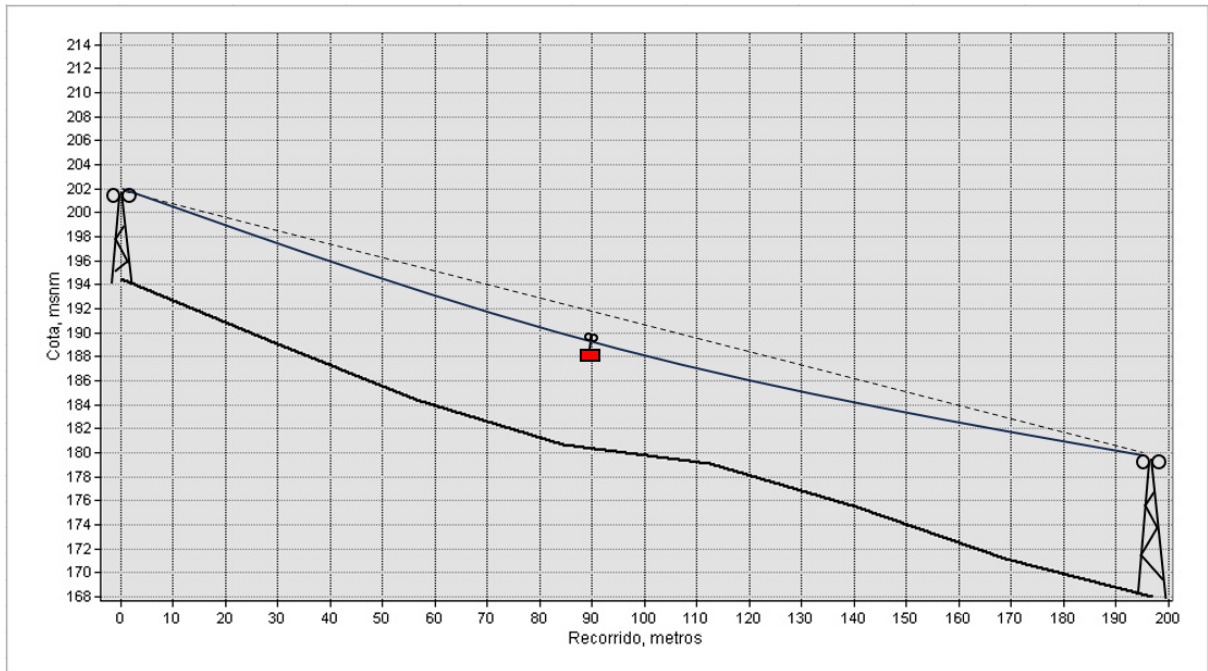


- **Tramo 16**

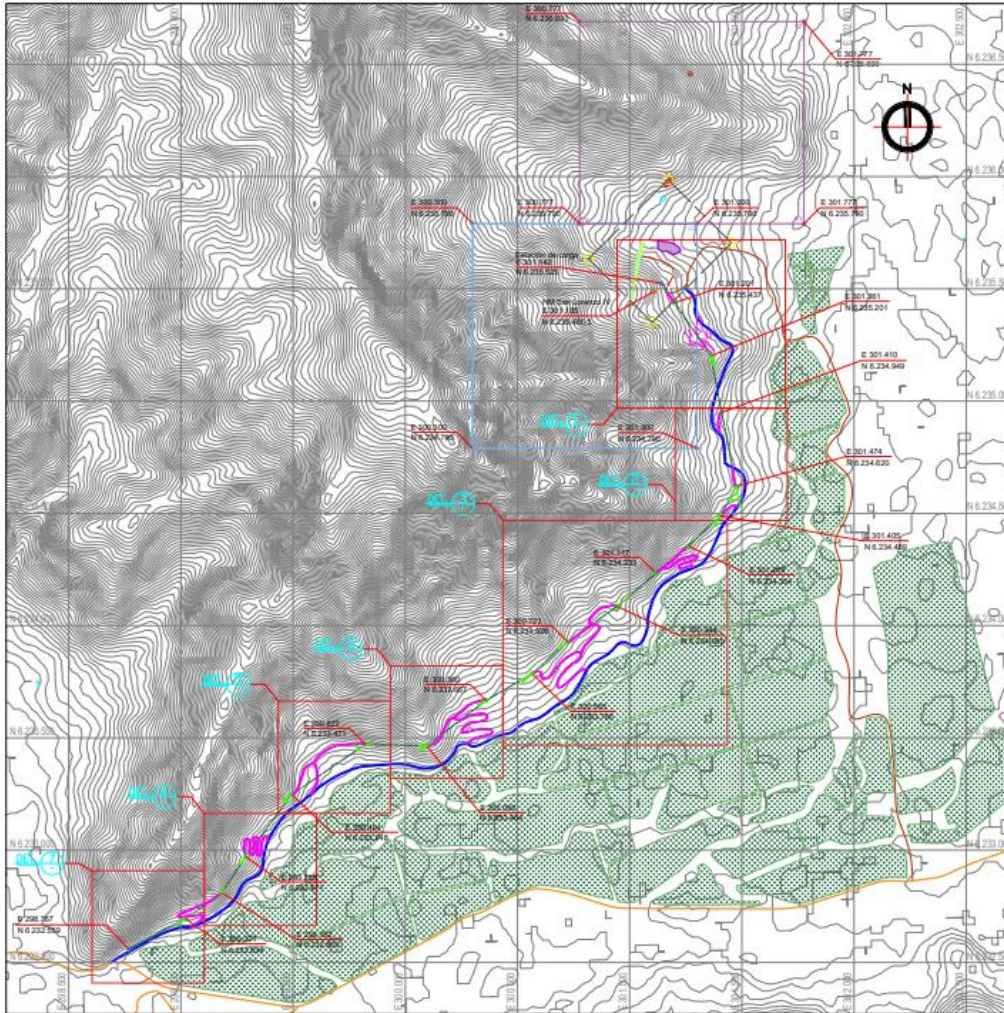




- **Tramo 17**



## 10.2 Anexo B



Disposición General – Camino Acceso – Ocupación  
Escala: 1:10000

DIMENSIONAMIENTO (m)	
Camino acceso mina	4.900
Senderos provisionarios	4.730
Altura media de torres	12
Distancia media entre torres	250

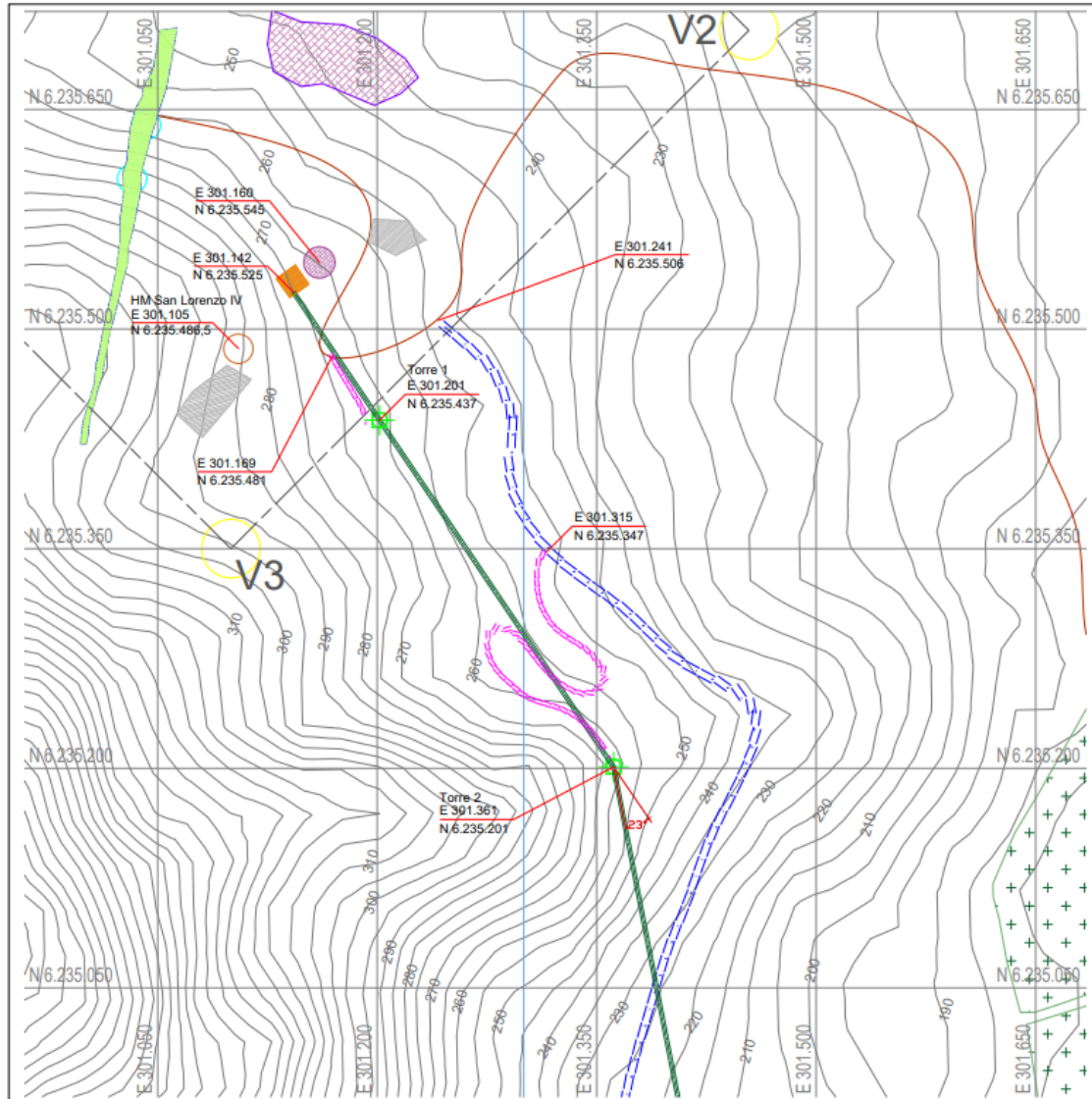
ÁREA DE OCUPACIÓN		
PUNTO	ESTE	NORTE
V1	301.171	6.235.986
V2	301.454	6.235.704
V3	301.100	6.235.350
V4	300.817	6.235.633
Área	200.000 m <sup>2</sup> / 20 Ha	

LEYENDA

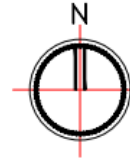
— CATENARIA DE ANDARIVEL	⊕ RECURSOS INFERIDOS
— SENDEROS PROVISIONARIOS	■ CUERPO AURÍFERO
— CAMINO ACCESO MINA	■ INSTALACIONES
— CAMINO ACCESO PROVISIONARIO	■ VIÑEDOS
— RED VIAL	■ ZONA DE ACOPIO
— PROPIEDAD MINERA SAN LORENZO IV	■ ESTACIONES DE CARGA Y DESCARGA
— PROPIEDAD MINERA SAN LORENZO II	■ TORRES
— LIMITES DE OCUPACIÓN	
● VÉRTICES PARA OCUPACIÓN	
○ PORTALES	

DATUM Y SISTEMA PROYECTIVO: PSAD56 Y UTM ZONA 19S

 UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA	MIN 195 - ASISTENCIA TÉCNICA SOLIDARIA Departamento de Metalurgia y Materiales
	<b>MINA SAN LORENZO</b>
ESCALA: 1:10000	REGIÓN METROPOLITANA - PROVINCIA DE ALHUÉ - COMUNA DE MELIPILLA
Fecha: Diciembre de 2024	

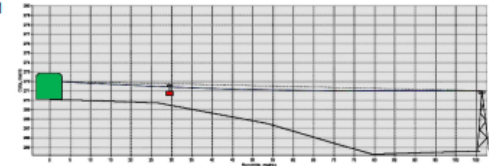


Detalle 1 - Tramos 1, 2 y 3  
Esc. 1:1500

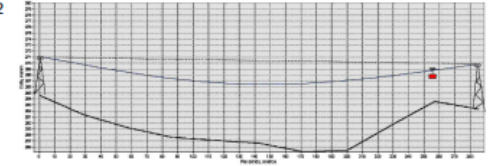


Sistema de transporte	Base [msnm]	Alto [m]	Cúspide [msnm]
Estación cima	270	2	272
Torre 1	265	6	271
Torre 2	263	7	270

Tramo 1



Tramo 2



LEYENDA

CATENARIA DE ANDARIVEL	CUERPO AURIFERO
SENDEROS PROVISORIOS	INSTALACIONES
CAMINO ACCESO MINA	VIÑEDOS
CAMINO ACCESO PROVISORIO	ZONAS DE ACOPIO
PROPIEDAD MINERA SAN LORENZO IV	ESTACION DE CARGA
LÍMITES DE OCUPACIÓN	TORRES
VÉRTICES PARA OCUPACIÓN	
PORTALES	

DATUM Y SISTEMA PROYECTIVO: PSA056 Y UTM ZONA 19S



MIN 195 - ASISTENCIA TÉCNICA SOLIDARIA  
Departamento de Metalurgia y Materiales

ESCALA:  
1:1500

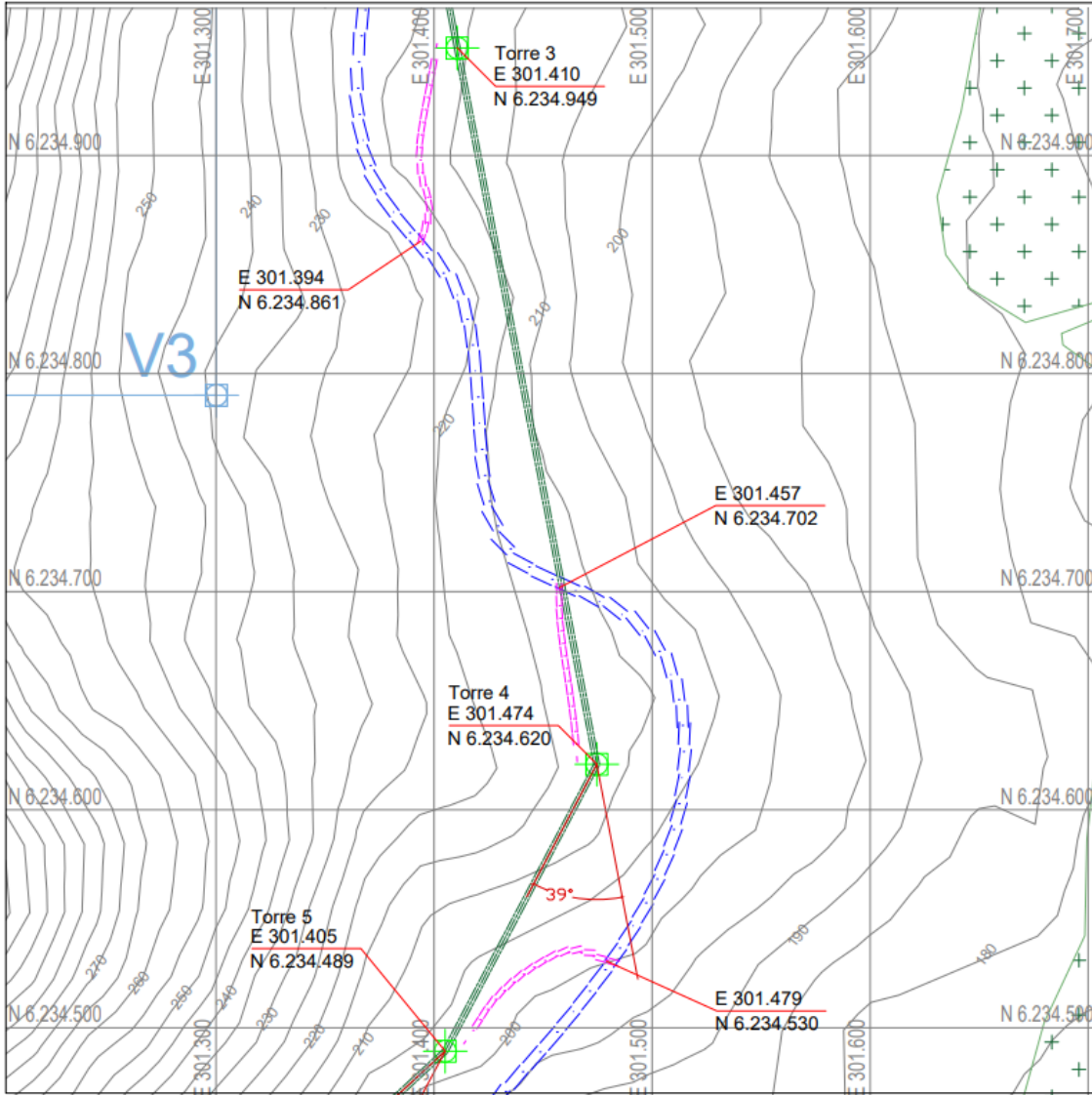
**MINA SAN LORENZO**

Fecha:  
Diciembre de 2024

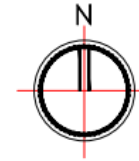
REGIÓN METROPOLITANA - PROVINCIA DE ALHUE - COMUNA DE MELIPILLA

2 DE 8

Formato A1

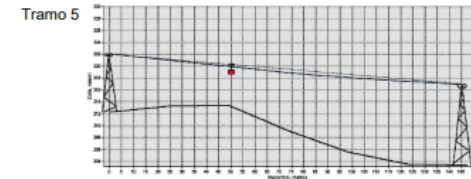
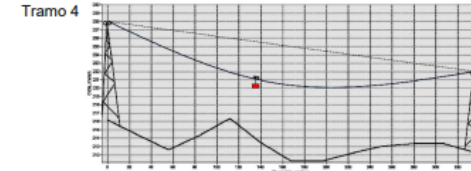


Detalle 2 - Tramos 4 y 5  
ESC. 1:1000



Sistema de transporte	Base [msnm]	Alto [m]	Cúspide [msnm]
Torre 3	216	12	228
Torre 4	213	9	222
Torre 5	203	14	217

Nota: Torre 4 corresponde a una estación de cambio de ángulo



LEYENDA

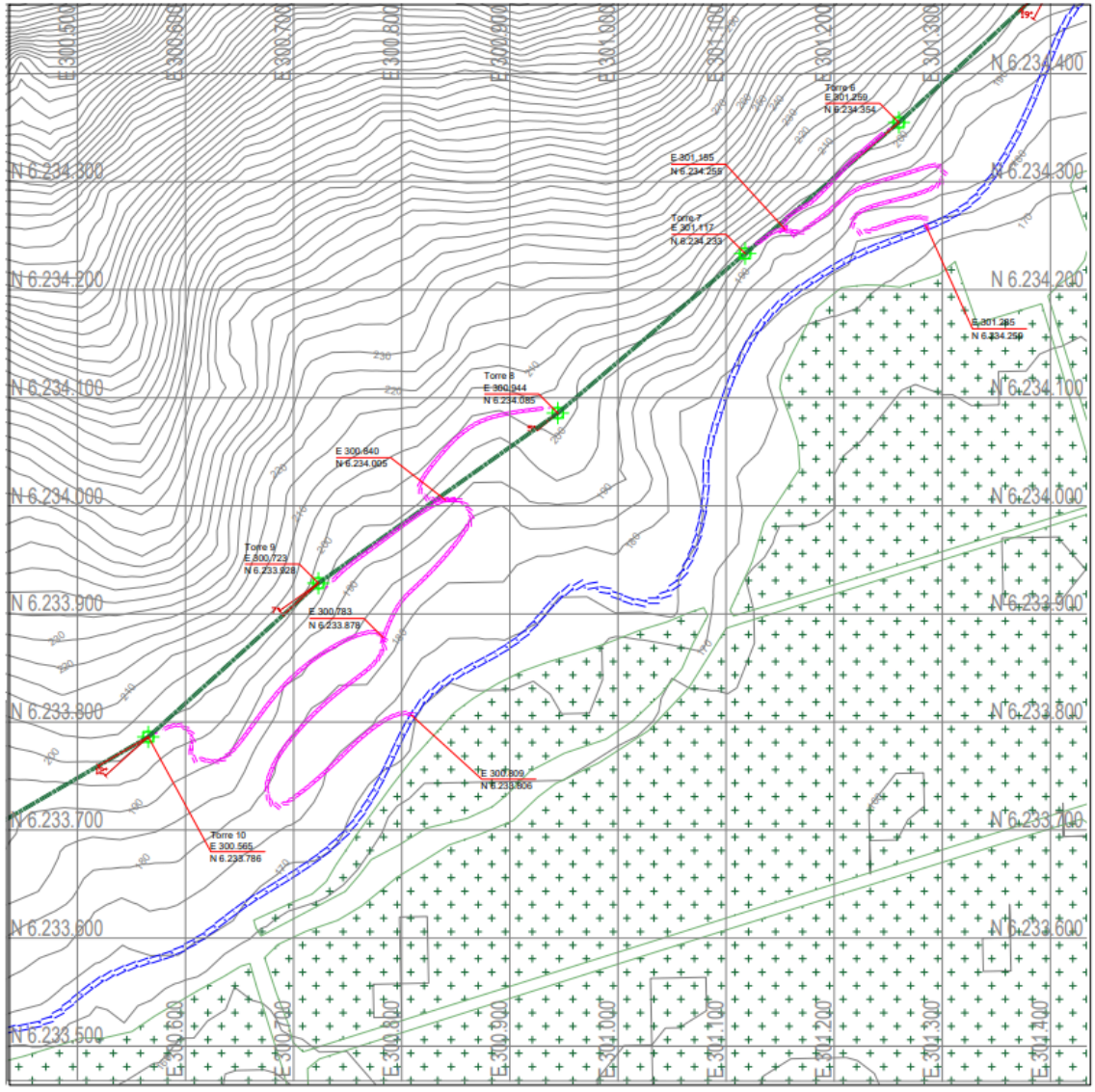
	CATENARIA DE ANDARIVEL
	SENDEROS PROVISORIOS
	CAMINO ACCESO MINA
	PROPIEDAD MINERA SAN LORENZO IV
	VIÑEDOS
	TORRES

DATUM Y SISTEMA PROYECTIVO: PSAD56 Y UTM ZONA 19S

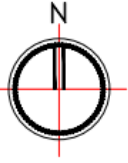
 UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA	MIN 195 - ASISTENCIA TÉCNICA SOLIDARIA Departamento de Metalurgia y Materiales
	<b>MINA SAN LORENZO</b>
ESCALA: 1:1000 Fecha: Diciembre de 2024	REGIÓN METROPOLITANA - PROVINCIA DE ALHUÉ - COMUNA DE MELIPILLA

3 DE 8

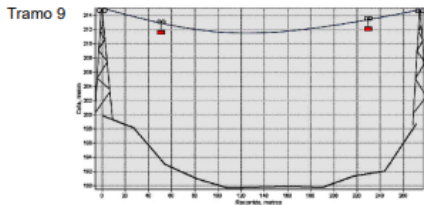
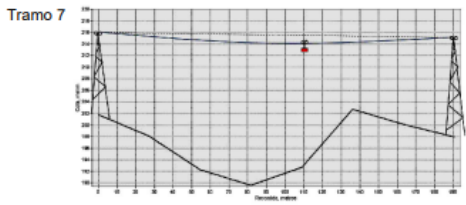
Formato A1



Detalle 3 - Tramos 6 al 11  
ESC. 1:2000



Sistema de transporte	Base [msnm]	Alto [m]	Cúspide [msnm]
Torre 6	202	14	216
Torre 7	198	17	215
Torre 8	200	15	215
Torre 9	199	16	215
Torre 10	200	14	214



LEYENDA

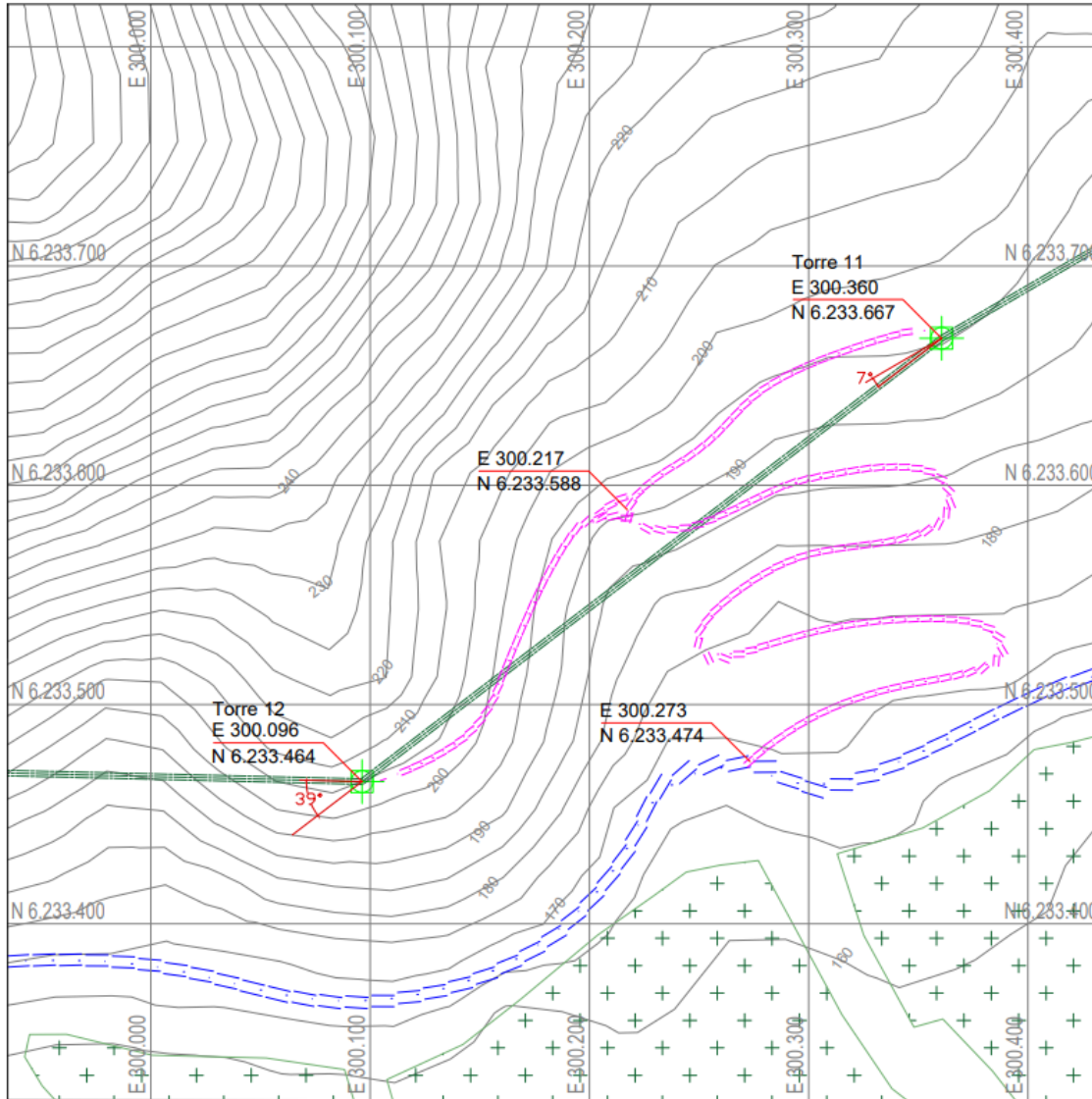
- CATENARIA DE ANDARIVEL
- SENDEROS PROVISORIOS
- - - CAMINO ACCESO MINA
- VIÑEDOS
- TORRES

DATUM Y SISTEMA PROYECTIVO: PSAD56 Y UTM ZONA 18S

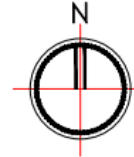
 UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA	<b>MIN 195 - ASISTENCIA TÉCNICA SOLIDARIA</b> Departamento de Metalurgia y Materiales
	<h1>MINA SAN LORENZO</h1>
ESCALA: 1:2000	REGIÓN METROPOLITANA - PROVINCIA DE ALHUÉ - COMUNA DE MELIPILLA
Fecha: Diciembre de 2024	

4 DE 8

Formato A1



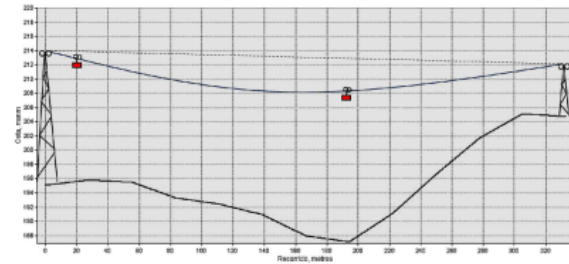
Detalle 4 - Tramos 11, 12 y 13  
Esc. 1:1000



Sistema de transporte	Base [msnm]	Alto [m]	Cúspide [msnm]
Torre 11	196	18	214
Torre 12	205	7	212

Nota: Torre 12 corresponde a una estación de cambio de ángulo

Tramo 12



LEYENDA

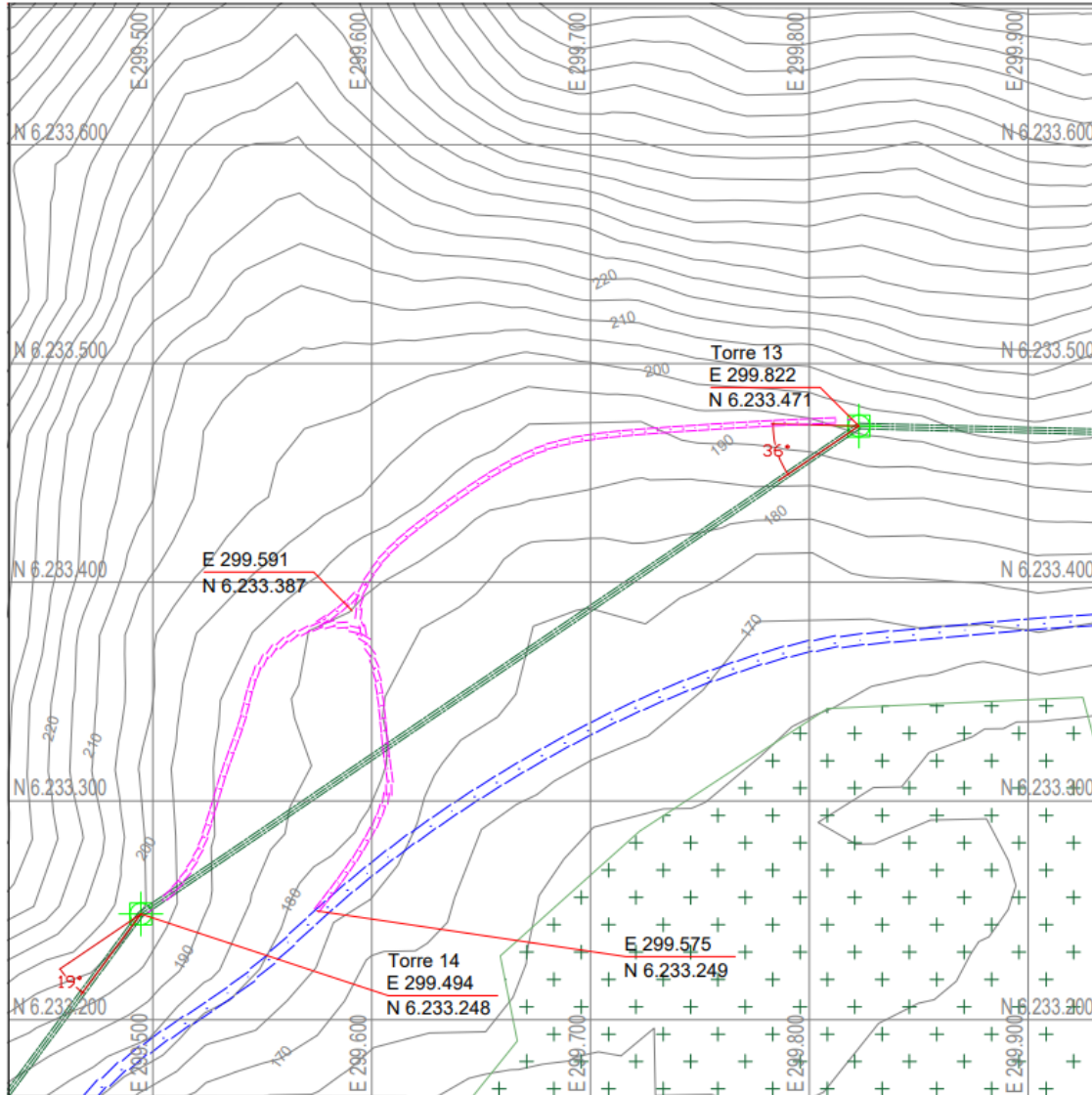
	CATENARIA DE ANDARIVEL
	SENDEROS PROVISORIOS
	CAMINO ACCESO MINA
	VIÑEDOS
	TORRES

DATUM Y SISTEMA PROYECTIVO: PSAD56 Y UTM ZONA 19S

 UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA	MIN 195 - ASISTENCIA TÉCNICA SOLIDARIA Departamento de Metalurgia y Materiales
	<b>MINA SAN LORENZO</b>
ESCALA: 1: 1000  Fecha: Diciembre de 2024	REGIÓN METROPOLITANA - PROVINCIA DE ALHUE - COMUNA DE MELIPILLA

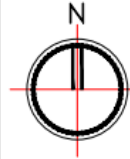
5 DE 8

Formato A1



Detalle 5 – Tramos 13, 14 y 15

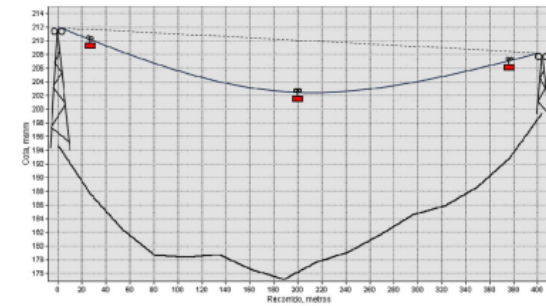
ESC. 1:1000



Sistema de transporte	Base [msnm]	Alto [m]	Cúspide [msnm]
Torre 13	195	17	212
Torre 14	200	8	208

Nota: Torre 13 corresponde a una estación de cambio de ángulo

Tramo 14



LEYENDA

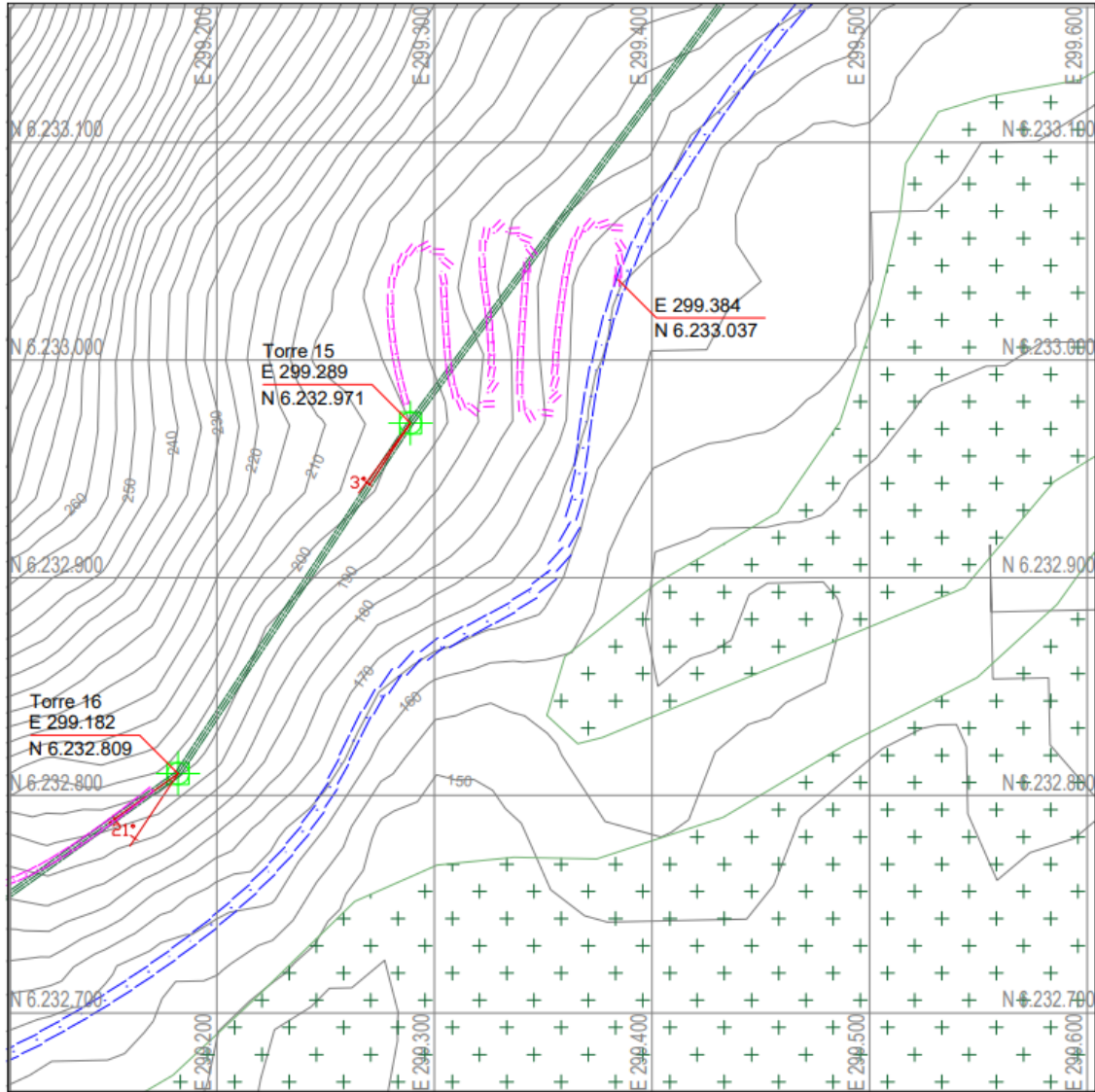
	CATENARIA DE ANDARIVEL
	SENDEROS PROVISORIOS
	CAMINO ACCESO MINA
	VIÑEDOS
	TORRES

DATUM Y SISTEMA PROYECTIVO: PSAD56 Y UTM ZONA 19S

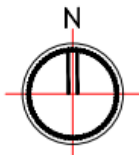
	MIN 195 - ASISTENCIA TÉCNICA SOLIDARIA Departamento de Metalurgia y Materiales
	<b>MINA SAN LORENZO</b>
ESCALA: 1:1000  Fecha: Diciembre de 2024	REGIÓN METROPOLITANA - PROVINCIA DE ALHUE - COMUNA DE MELIPILLA

6 DE 8

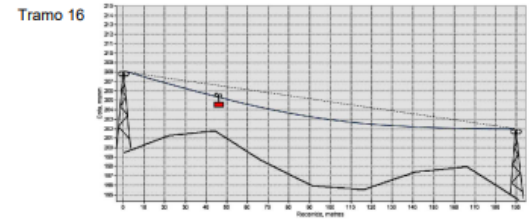
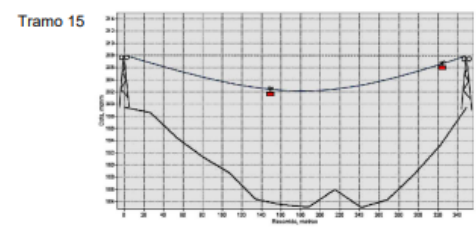
Formato A1



Detalle 6 - Tramos 15, 16 y 17  
Escala: 1:1000



Sistema de transporte	Base [msnm]	Alto [m]	Cúspide [msnm]
Torre 15	200	8	208
Torre 16	195	7	202

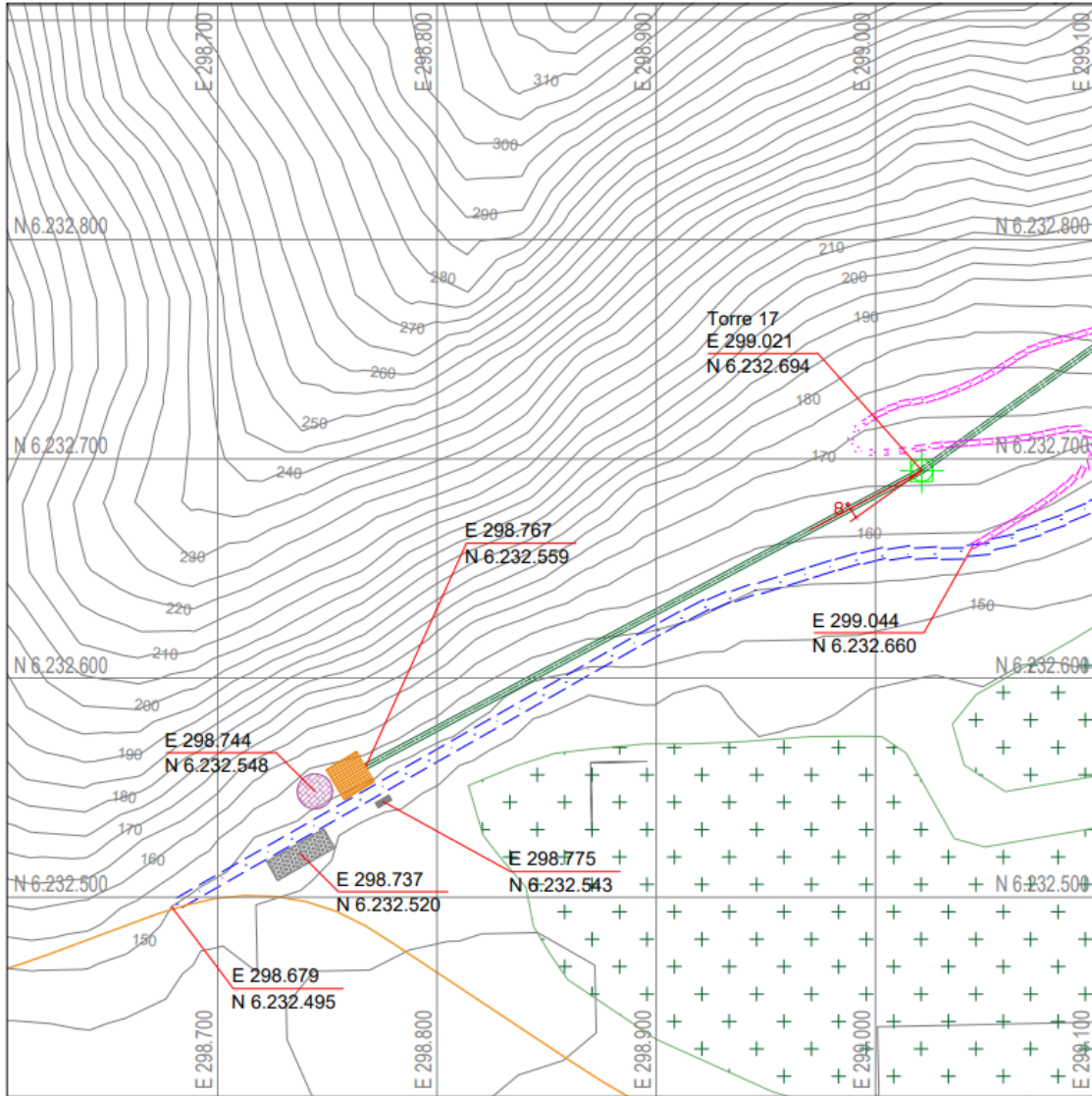


LEYENDA

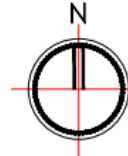
- CATENARIA DE ANDARIVEL
- SENDEROS PROVISORIOS
- CAMINO ACCESO MINA
- VIÑEDOS
- TORRES

DATUM Y SISTEMA PROYECTIVO: PSAD56 Y UTM ZONA 19S

	MIN 195 - ASISTENCIA TÉCNICA SOLIDARIA Departamento de Metalurgia y Materiales
	<h1>MINA SAN LORENZO</h1>
ESCALA: 1:1000	REGIÓN METROPOLITANA - PROVINCIA DE ALHUÉ - COMUNA DE MELIPILLA
Fecha: Diciembre de 2024	

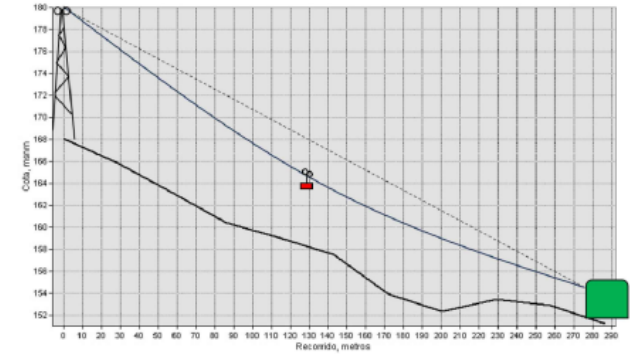


Detalle 7 - Tramos 17 y 18  
Esc. 1:1000



Sistema de transporte	Base [msnm]	Alto [m]	Cúspide [msnm]
Torre 17	165	12	177
Estación base	153	2	155

Tramo 18 (Final)



LEYENDA

PATIO DE MANIOBRAS	INSTALACIONES
CATENARIA DE ANDARIVEL	VIÑEDOS
SENDEROS PROVISORIOS	ZONA DE ACOPIO
CAMINO ACCESO MINA	ESTACIÓN DE DESCARGA
RED VIAL	
TORRES	

DATUM Y SISTEMA PROYECTIVO: PSA056 Y UTM ZONA 19S

	MIN 195 - ASISTENCIA TÉCNICA SOLIDARIA Departamento de Metalurgia y Materiales
	<b>MINA SAN LORENZO</b>
ESCALA: 1:1000 Fecha: Diciembre de 2024	REGIÓN METROPOLITANA - PROVINCIA DE ALHUÉ - COMUNA DE MELIPILLA

8 DE 8

Formato A1