



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA EN MINAS

**EFFECTO DEL DISEÑO MINERO EN LA VELOCIDAD DE LOS EQUIPOS DE
TRANSPORTE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL EN MINAS

GUILLERMO ANTONIO MARAMBIO PIZARRO

PROFESOR GUIA:

ENRIQUE RUBIO ESQUIVEL

MIEMBROS DE LA COMISION:

HANS GÖPFERT HIELBIG
JAIME CHACON FERNANDEZ

SANTIAGO DE CHILE
ABRIL 2010

Resumen ejecutivo

Una de las motivaciones principales de este trabajo es proponer una mejora en la forma de estimación de los parámetros de planificación largo plazo, la que en base a la historia e incluyendo el diseño permitirá en un futuro:

1. Mejorar la estimación de flota de la mina.
2. Realizar estudios con el fin de concluir acerca de mejoras en los diseños (cantidad de switch backs, anchos de rampa, etc..) en pos de mejorar la valorización de la empresa.

Se tiene como objetivo principal el entregar una primera aproximación acerca de la influencia de los diseños mineros, específicamente orientados a las rampas, sobre el rendimiento de los camiones de extracción en la mina Radomiro Tomic de Codelco Norte.

El trabajo se basa en un análisis de datos que tiene como producto final un modelo de velocidades de los equipos de transporte actuales de la mina, en función de ciertas variables de diseño que se definieron como críticas en conjunto con las áreas de operaciones y planificación corto-largo plazo.

Se determinó que existen ciertos factores en las rampas que afectan de sobremanera a las velocidades de los camiones como los siguientes:

1. Pendiente
2. Cambios de pendiente
3. Angostamientos (Anchos de rampa)
4. Switch backs
5. Entradas a fases

Para obtener la información necesaria con el fin de alimentar al modelo, se generó una base de datos basada en filtros de tiempos obtenidos de los GPS de los equipos de la mina, alineándola con la topografía real de la mina en cada periodo.

Luego, se propuso un modelo lineal que pondere las velocidades históricas obtenidas por los camiones en estas variables, por el largo del segmento que las contiene y finalmente se calibró llegando a un modelo de velocidades de la forma:

$$vel = f(\text{pendiente, bidireccionalidad, switch - back, entrada fase, cambios de pendiente})$$

Con una mejora en la estimación de velocidades dada por el error estándar de estimación: 7km/h para la velocidad estimada actual comparado con los 3km/h de error del modelo propuesto.

Este modelo fue considerado como aceptable por la empresa cliente.

Contenido

CAPITULO I: INTRODUCCION	1
I.1 Motivación	1
I.2 Objetivos	2
I.2.1 Generales	2
I.2.2 Específicos	2
I.3 Alcances	3
I.4 Metodología	3
I.4.1 Conceptualización.....	3
I.4.2 Identificación de variables criticas.....	4
I.4.3 Construcción base de datos	5
I.4.4 Análisis de datos	5
I.4.5 Construcción modelo	7
I.4.6 Calibración modelo	7
CAPITULO II: ANTECEDENTES.....	8
II.1 Descripción de la Faena	8
II.1.1 Historia	8
II.1.2 Producción.....	8
II.1.3 Situación actual de la mina.....	10
II.1.4 Sistema de turnos	13
II.1.5 Proyectos.....	13
II.2 Consideraciones	14
II.2.1 Diseño	14
II.2.2 Planificación minera.....	15
II.3 Cálculo de flota.....	17
II.3.1 Ejemplos literatura.....	17
II.3.2 Metodología actual usada por Codelco Norte.....	20
CAPITULO III: BASE DE DATOS	21
III.1 Identificación de variables relevantes	21
III.1.1 Definición de cada una de las variables	22
III.2 Generación de base de datos.....	29
III.2.1 Validación de la información GPS.....	29

III.2.2 Velocidades extraídas por GPS	31
III.2.3 Mediciones en terreno	35
III.3 Análisis de datos	36
III.3.1 Pendiente	37
III.3.2 Bidireccionalidad.....	40
III.3.3 Switch back.....	46
III.3.4 Entrada de fase	47
III.3.5 Cambios de pendiente	47
CAPITULO IV: CONSTRUCCION DEL MODELO	49
IV.1 Cargado.....	50
IV.2 Vacío	51
IV.3 Calibración del modelo	53
IV.3.1 Calibración Komatsu	54
IV.3.2 Calibración Liebherr.....	56
IV.4 Análisis de resultados	57
CAPITULO V: ESTUDIO CASO BASE	61
V.1 Metodología.....	61
V.2 Estudio PSD 2010	66
V.2.1 Casos de estudio.....	67
V.2.2 Resultados	67
V.2.3 Análisis de resultados	69
CAPITULO VI: CONCLUSIONES	71
VI.1 Discusión y Conclusiones	71
VI.2 Recomendaciones	74
BIBLIOGRAFÍA	76
ANEXOS.....	77

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Esquema de variables de rampa en mina.....	4
Ilustración 2: velocidad afectada por una variable.....	6
Ilustración 3: velocidad afectada por 2 variables.....	6
Ilustración 4: Velocidad afectada por varias variables.....	6
Ilustración 5: Ubicación de Rampa Este.....	11
Ilustración 6: Ubicación Rampa Sur.....	11
Ilustración 7: Ubicación Baliza.....	12
Ilustración 8: Fases en explotación.....	12
Ilustración 9: Esquema de talud global e interrampa.....	14
Ilustración 10: Talud sin rampa.....	15
Ilustración 11: Talud con rampa.....	15
Ilustración 12: Importancia del viaje en el tiempo de ciclo.....	20
Ilustración 13: Importancia de viaje cargado y vacío en tiempo de ciclo.....	21
Ilustración 14: Ejemplo de cambio del talud de diseño en función del ancho de rampa.....	23
Ilustración 15: Esquema de bidireccionalidad de un tramo.....	24
Ilustración 16: Ejemplo de bidireccionalidad de un tramo.....	24
Ilustración 17: Ejemplo de Switch back.....	25
Ilustración 18: Ejemplo de cambio de pendiente.....	25
Ilustración 19: Ejemplo de Entrada Fase.....	26
Ilustración 20: Ejemplo de cruce entre rampas.....	26
Ilustración 21: Ejemplo de curva en rampa.....	27
Ilustración 22: Esquema aéreo tipo cerro-poste.....	28
Ilustración 23: Esquema de aéreo tipo poste-poste.....	28
Ilustración 24: Rutas a estudiar para comparación (línea en rojo).....	30
Ilustración 25: Esquema del filtro espacial.....	32
Ilustración 26: Esquema varios registros por baliza.....	33
Ilustración 27: Esquema de filtro según registros por baliza.....	33
Ilustración 28: Esquema de tiempo de viaje erróneo.....	34
Ilustración 29: Esquema de datos ideales.....	34
Ilustración 30: Esquema de ajuste en balizas.....	35
Ilustración 31: Esquema de medición de tiempos para sector baliza (ruta en línea roja).....	36
Ilustración 32: Velocidades recomendadas por fabricante para camión bajando cargado.....	38
Ilustración 33: Histograma de velocidades Komatsu cargado en pendiente.....	39
Ilustración 34: Histogramas de velocidades Liebherr cargados en pendiente.....	39
Ilustración 35: Histograma de velocidad para Liebherr en tramo AD F-15.....	40
Ilustración 36: Errores absolutos vs ancho de rampa crítico.....	42
Ilustración 37: Histograma velocidades Junio para Komatsu bajando vacío tramo AD F-15.....	44
Ilustración 38: Histograma velocidades Junio para Komatsu bajando vacío tramo Este A.....	44
Ilustración 39: VBD vs [%BD] para ambas flotas.....	45
Ilustración 40: Tendencia de VBD según [%BD].....	45
Ilustración 41: Errores absolutos para los Komatsu cargados.....	55

Ilustración 42: Errores absolutos para Komatsu vacios	55
Ilustración 43: Errores absolutos para los Liebherr cargados.....	56
Ilustración 44: Errores absolutos para los Liebherr vacios	56
Ilustración 45: Nube de correlación para la estimación del modelo	57
Ilustración 46: Nube de correlación para la estimación actual	57
Ilustración 47: Errores reales de estimación (Komatsu cargado)	59
Ilustración 48: Exportacion de movimientos mina en PlanR.....	62
Ilustración 49: Formato ingreso movimiento a planilla de velocidad.....	62
Ilustración 50: Eleccion de origen a exportar en PlanR.....	62
Ilustración 51: Eleccion de destino a exportar en PlanR	63
Ilustración 52: Visualizacion de ruta a exportar en PlanR	63
Ilustración 53: Exportación de ruta en PlanR	63
Ilustración 54: Medicion de anchos reales	64
Ilustración 55: Formato ingreso de anchos reales en planilla	65
Ilustración 56: Planilla de calculo de tiempos de viaje.....	65
Ilustración 57: Resultado simulaciones de encuentro en angostamientos.....	66
Ilustración 58: Ingreso de tiempos de viaje en planilla de calculo de equipos.....	67
Ilustración 59: Flota requerida segun caso.....	68

Indice de Tablas

Tabla 1: Rutas a estudiar para comparación	29
Tabla 2: Comparación GPS vs TERRENO	30
Tabla 3: Código de los caex a estudiar	31
Tabla 4: Formato de base de datos.....	31
Tabla 5: Comparación datos totales vs datos utilizados	36
Tabla 6: Máximas velocidades según reglamento	37
Tabla 7: Estadísticas básicas para Komatsu cargado en pendiente	39
Tabla 8: Estadísticas básicas para Liebherr cargado en pendiente.....	39
Tabla 9: Características de la rampa ejemplo que se utilizó	43
Tabla 10: Errores asociados según criterio utilizado.....	43
Tabla 11: Factores para las tendencias de VBD.....	45
Tabla 12: VBD para camiones en horizontal cargados (ambas flotas)	46
Tabla 13: VBD para camiones en horizontal vacios (ambas flotas)	46
Tabla 14: Velocidades relativas a la aceleración de los camiones (ambas flotas)	47
Tabla 15: Distancias de aceleración para ambas flotas.....	48
Tabla 16: Velocidades utilizadas actualmente.....	54
Tabla 17: Características de rutas comparadas para Komatsu.....	54
Tabla 18: media de errores de las estimaciones komatsu	55
Tabla 19:Caracteristicas de rutas comparadas para Liebherr	56
Tabla 20: Media de los errores para las estimaciones Liebherr	57
Tabla 21: Coeficientes de correlación de Pearson	58
Tabla 22: Tiempos de viaje según caso	67

Tabla 23: Flotas requeridas segun caso.....	68
Tabla 24: Diferencia de flotas requeridas segun caso.....	69
Tabla 25: Diferencias de velocidades según variables	73
Tabla 26: Diferencia de productividad de un caex según variables.....	73

CAPITULO I: INTRODUCCION

I.1 Motivación

Dentro de la constante búsqueda del real valor de una empresa, se contempla mejorar la estimación de los planes de producción, en el sentido de buscar el fondo de por qué algunos planes tienen un cumplimiento alto y otros no.

En esta búsqueda, uno de los focos es el diseño minero, orientado a verificar como influyen los diseños en la productividad que tienen las operaciones unitarias de la mina (perforación/tronadura, carguío/transporte).

En la División Codelco Norte se han hecho esfuerzos por llegar a aproximaciones de estas productividades en función del diseño. En estos trabajos no se ha considerado la operación de transporte (enfoque dado al carguío), por lo que se plantea como la motivación principal de esta memoria.

Dentro de los factores que pueden influir en la productividad real de los camiones se encuentran:

- Diseños que aseguren el buen funcionamiento del sistema de transporte
- Correcta estimación de velocidades, disponibilidades, utilización efectiva, distancias y factores de carga que permitan tener una buena estimación de flota
- Cumplimiento con las inversiones en un periodo dado
- Búsqueda de cumplimiento de las líneas planteadas por largo plazo (especialmente por los diseños de rampas)
- Buena coordinación para la operatividad de las rampas
- Re-estimación de flota
- Mantenición (o aumento) de las disponibilidades comprometidas
- Mantenición (o aumento) de las utilizaciones efectivas comprometidas
- Buena condición de los caminos, coordinación de otros equipos
- Cumplimiento de las líneas entregadas por corto-plazo
- Eficiente asignación de camiones

En este sentido, el estudio propuesto se basa en el entendimiento de cómo la productividad de un camión puede cambiar en función de los diseños, con el fin de tener consideraciones de diseño en el largo plazo para maximizar la productividad de éstos, o bien para re-estimar las flotas en función de cada diseño. Es decir, a modo de ejemplo, como cambia el rendimiento de un camión que tiene que circular por una ruta con una gran cantidad de switch-backs y con poco recorrido versus una distancia media mayor y sin switch backs.

El enfoque principal de la productividad, para este estudio, está dado por el cambio de la velocidad de los camiones y no por el comportamiento de las disponibilidades o las utilizaciones efectivas de los equipos, en función de los diseños. Es decir, estimar la influencia del diseño en la productividad de los equipos y por ende en la construcción del plan de producción.

I.2 Objetivos

I.2.1 Generales

Cuantificar y modelar el efecto real de algunas variantes del diseño minero en la velocidad de los equipos de transporte.

I.2.2 Específicos

- Definir las variables críticas de diseño que más impactan en la velocidad de los camiones. Esto en base a la experiencia de operadores y planificadores.
- Generar una metodología para la construcción de una base de datos que sea replicable y en la cual la información rescatada sirva como un input en el estudio de las velocidades (tanto en la generación de un modelo como en la comparación con la realidad).
- Analizar, tanto cuantitativa como cualitativamente, los datos obtenidos de la etapa de generación de base de datos.
- Proponer modelo de velocidades, calibrado en función de la realidad, que dependa de ciertas variables de diseño (anteriormente definidas).

I.3 Alcances

El trabajo se realizará íntegramente en la mina Radomiro Tomic de Codelco Norte. Se considerará un modelo empírico y por ende se extraerán datos reales tomados en terreno y obtenidos de base de datos de los camiones.

Actualmente la faena cuenta con flotas de camiones Liebherr T282B, Komatsu 930E, Komatsu (Trepasa) y Caterpillar. De éstos, los que sustentan el movimiento de estéril y mineral son las 2 primeras flotas y a la fecha de realización del estudio ya se había considerado dar de baja a la flota Caterpillar por lo que el modelo será desarrollado para las principales flotas (Liebherr T282B y Komatsu 930E).

Se planea alimentar al modelo con información correspondiente a las rampas actuales y de la misma forma será calibrado.

El producto final es un modelo de velocidades que se adecua a las variables definidas y que estará compuesto por submodelos de viaje cargado y vacío, para cada flota.

I.4 Metodología

I.4.1 Conceptualización

Se construirá un modelo de velocidades de los camiones existentes en la faena. Es decir, de acuerdo a las velocidades actuales, se buscará la dependencia de la velocidad media en función de las variables de la rampa que se consideren más relevantes.

$$Vel = f(v_1, v_2 \dots v_n)$$

Debido a que los camiones presentan distintas características técnicas se procederá a generar un modelo para cada flota y cada uno compuesto de sub-modelos según el tipo de viaje (cargado o vacío).

Se considerará un modelo lineal en el cual se pondere la variable correspondiente al segmento de influencia de esta variable. Considerando el esquema que se presenta a continuación:

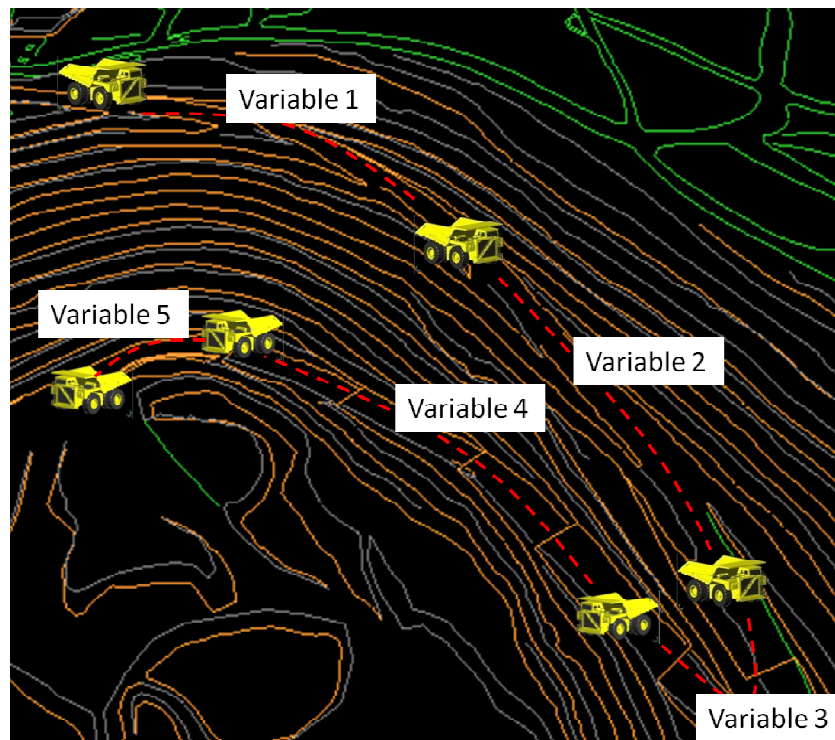


Ilustración 1: Esquema de variables de rampa en mina

Con la longitud de influencia de cada variable se tendrá un modelo de la siguiente forma:

$$Vel = \frac{D_z}{\sum_{i=1}^n t_i} = \frac{D_z}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_i}}$$

En donde los V_i son las velocidades características del camión cuando la variable i está presente, y d_i es el largo del segmento en el cual se considera a la variable como influyente.

1.4.2 Identificación de variables críticas

Se procede a determinar cuáles son las variables críticas que influyen en la velocidad de los camiones. En este sentido, sin omitir la información relativa a la mecánica del equipo, se considera que la experiencia es sumamente relevante por lo que se busca aunar criterios entre operadores, ingenieros de operación e ingenieros de planificación corto-largo plazo.

Con este enfoque se determina que el lugar en el cual se realizará este estudio se distribuye de la siguiente manera:

- En camiones, junto a operadores

- En mina, ingenieros de operación y despachadores
- En sector mina, ingenieros corto plazo
- En área de planificación, ingenieros largo plazo

I.4.3 Construcción base de datos

Este proceso consta de 2 grandes aspectos:

1. Definir la existencia de las variables, anteriormente identificadas, en la mina, y acotarlas de manera que la velocidad sea representativa de la variable a analizar y no de otro factor.
2. Estimar las velocidades en estos tramos representativos de la variable.

Luego, la forma de obtención de estas velocidades puede ser presencial (registrando los tiempos de viaje) o a partir de una base de datos histórica. Siendo la forma presencial mucho más confiable ya que se sabe lo que ocurrió exactamente con el camión (detenciones, bajas de velocidad, etc..) pero a su vez limita las variables a medir de acuerdo a las que existen en la mina en el periodo de medición. Por otro lado la información histórica no asegura datos 100% representativos pero se pueden medir mucho más variables (rampas existentes en otros periodos). Para el estudio actual se consideran las 2 opciones, siendo la información histórica como principal y la información de terreno como complementaria.

I.4.4 Análisis de datos

El objetivo de este proceso es el de buscar los factores de velocidad y distancia asociados a cada una de las variables que se determinaron. Para esto, se acotará cada segmento que represente a una variable con el fin de minimizar el efecto de otros factores presentes. Por ejemplo, si una variable es lo suficientemente acotada y presenta una distribución de velocidades homogénea, entonces es difícil suponer que la velocidad asociada a esa variable sea el promedio de estas.

A modo de ejemplo se presentan las siguientes situaciones:

- Una Variable

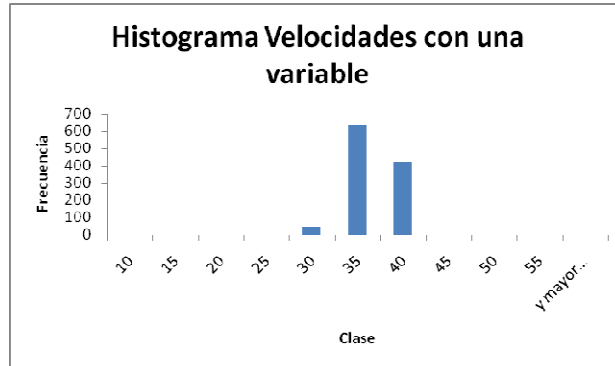


Ilustración 2: velocidad afectada por una variable

- Dos Variables

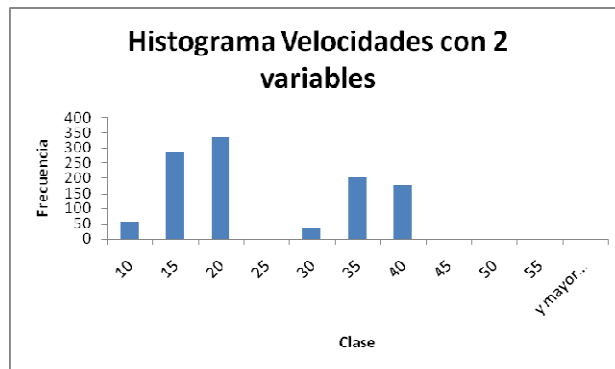


Ilustración 3: velocidad afectada por 2 variables

- Varias Variables

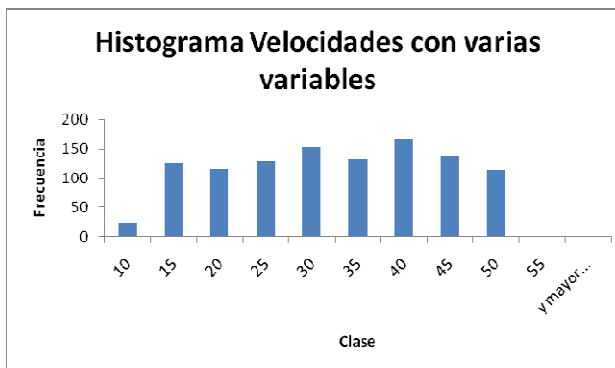


Ilustración 4: Velocidad afectada por varias variables

I.4.5 Construcción modelo

Ya con las relaciones definidas, y las distancias de influencia de cada una de las variables, se procede a ponderar las velocidades de camiones según las variables presentes en la rampa.

Para esto se harán los supuestos que sean necesarios, con el respectivo fundamento.

I.4.6 Calibración modelo

Finalmente se considerarán rutas completas, configuradas por varias variables, en las cuales se calcularán las velocidades medias según modelo, según la estimación actual de la empresa y se compararán con las velocidades reales de los camiones de extracción (caex) según los GPS.

Se tendrá muy en cuenta la situación actual de la mina, en el sentido de que pudiesen existir asignaciones preferenciales (mayor frecuencia de una flota en una rampa), condiciones particulares del camino, visibilidad, etc. El objetivo es poder realizar una comparación con los datos reales de la mina que están dentro del alcance del modelo y no con velocidades que pueden haber sido afectadas por otras variables.

CAPITULO II: ANTECEDENTES

II.1 Descripción de la Faena

II.1.1 Historia

La faena Radomiro Tomic, se encuentra ubicada en la provincia de El Loa, II Región de Antofagasta, al pie del cordón cordillerano de los Andes, a 3.000 metros sobre el nivel del mar y a 45 kilómetros al norte de la ciudad de Calama.

Esta fue creada el año 1995 como la quinta división de Codelco Chile, situación que se mantuvo hasta el año 2002 en donde, debido a la fusión con la División Chuquicamata, pasa a formar parte de la nueva división Codelco Norte.

El yacimiento fue descubierto en 1952, como parte de un programa de exploraciones de posibles extensiones de la mineralización de óxidos bajo el área denominada Pampa Norte, inmediatamente al norte del rajo de Chuquicamata, llevado a cabo por la empresa Chile Exploration Company. Desde su descubrimiento hasta 1993, se realizaron labores de exploración en forma discontinua. Ya durante los años 1994 –1995, Codelco actualizó los estudios, reformulando las bases técnicas y de costos, para dar inicio al proyecto en Diciembre de 1995 y a la remoción de estéril en Abril de 1996.

II.1.2 Producción

El proceso productivo de la faena Radomiro Tomic, es un proceso principalmente hidrometalúrgico, que comienza con la extracción del mineral en operaciones a rajo abierto en bancos de 15 y 30 metros, utilizando métodos convencionales de perforación rotatoria, tronadura, carguío y transporte. Se extraen 300 ktpd de mineral con una relación media estéril/mineral de 1,5. Cuando el mineral ha sido extraído, es transportado al chancador primario, que se encuentra en el área norte del rajo, en camiones de alto tonelaje, los que alimentan directamente el chancador, de tipo giratorio, a razón de 180 ktpd aproximadamente, en esta etapa se logra reducir el tamaño del mineral a menos de 12”.

El producto resultante de este proceso se envía, a través de una correa transportadora de 890 metros de longitud, a un stockpile cerrado con capacidad efectiva de almacenamiento de 80.000 ton de carga viva.

Desde el stockpile, el material es conducido a través de siete correas transportadoras a distintas etapas de harneros y chancado hasta llegar a tamaños de 1". El mineral chancado es enviado mediante correas transportadoras a la etapa de aglomerado, donde se le agrega ácido sulfúrico, con el fin de humedecer el mineral y facilitar la etapa de lixiviación del mineral. Terminada esta etapa, el mineral es transportado mediante correas al apilador, descargando el mineral sobre una carpeta de HDPE (polietileno de alta densidad), formando 26 pilas pareadas removibles de 8 a 9 metros de altura. El material es regado, mediante goteo, con una solución ácida de refino, durante 45 días, momento en el cual el mineral ya ha agotado su capacidad de entregar solución de cobre. La solución de refino con que se riega el mineral queda cargada en cobre después del proceso, denominándose solución PLS, la que es conducida por cañerías a lagunas desarenadoras y almacenada en piscinas, para posteriormente ser enviada a la planta de extracción por solvente. Los ripios (mineral agotado) resultantes del proceso de lixiviación, son retirados desde las canchas de lixiviación por una rueda excavadora de capachos (rotopala), que descarga el mineral en una correa transportadora la que conduce el mineral a los botaderos donde es esparcido hasta alcanzar alturas de 120 metros máximo. La solución PLS es alimentada a la planta de extracción por solvente donde, en estanques mezcladores, entra en contacto con una solución orgánica (base kerosene) de baja concentración de cobre, la que extrae el mineral de la solución PLS, de manera selectiva por intercambio iónico. Posteriormente la mezcla se alimenta a estanques decantadores, donde se separan la fase orgánica, ahora cargada con iones de cobre, y el refino (solución ácida pobre en cobre). El orgánico cargado es enviado a una etapa de lavado donde se retira el cloro y posteriormente a una etapa de re extracción, mientras que el refino es enviado a las pilas de lixiviación. En la etapa de re extracción el orgánico cargado de cobre se pone en contacto con una solución electrolítica la que tiene un alto nivel de acidez, en esta etapa se produce un intercambio de iones de cobre desde el orgánico cargado al electrolito, las soluciones se mezclan y separan en equipos similares a los de la etapa de extracción. El orgánico descargado es reciclado a la etapa de extracción, mientras que el electrolito cargado de iones de cobre es filtrado para eliminar residuos de solución orgánica y sólidos, para ser alimentado a las celdas de la planta de electrobtención, las que tienen electrodos formados por una placa de plomo (ánodo) y una placa de acero inoxidable (cátodo). Al aplicar corriente continua a las celdas, el cobre contenido en el electrolito se deposita en las placas de acero, formando los cátodos. El electrolito descargado es re circulado a la etapa de re extracción y los cátodos, cuando han alcanzado un espesor suficiente, son retirados de las celdas mediante un puente grúa para ser lavados automáticamente con agua caliente con el fin de retirar restos de ácido y sulfato de cobre, posteriormente una máquina automática despegadora separa el cátodo de cobre de la placa de acero inoxidable, la que es devuelta a las celdas para un nuevo proceso de electrobtención.

En el proceso productivo se obtienen cátodos de cobre de tipo A, de alta pureza (99,99% de cobre) que son empaquetados para luego ser cargados y despachados. La producción durante el año 2009 fue de 300.000 toneladas de cobre fino.

II.1.3 Situación actual de la mina

En el periodo de estudio la faena cuenta con fases en producción de óxidos y sulfuros. El primero se da en las fases superiores como lo son la Fase 15 y Fase 16, que a la fecha se está abriendo. También se extrajeron óxidos de los primeros bancos de la Fase 14.

El sulfuro se extrae del fondo mina que corresponde a parte de la Fase 14 y la Fase 31. Se debe recordar que estos son trasladados a Chuquicamata para su procesamiento.

El sistema de rampas actual es simple y se compone de una rampa principal para el movimiento de mineral en general y otra para el movimiento de estéril. La rampa destinada al acarreo de mineral es la denominada Rampa Este, que comienza en el norte de la mina (zona donde está el chancador) llegando hasta una zona de cruce en donde conecta con la actual Fase 15 por medio de un tramo en horizontal denominado Baliza. La Rampa Este sigue su recorrido hasta el fondo mina mediante un switch back y desde ahí comienza una ruta interior mina que conecta a las fases 14 y 31.

Por otro lado, la fase 15 tiene su movimiento de estéril en el lado sur utilizando la Rampa Sur. Esta nace en un cruce en donde llegan las rutas Circunvalación y salida a Botadero Oeste, y llega hasta la Fase 15.

A continuación se presenta un esquema de la ubicación de las rampas y fases.

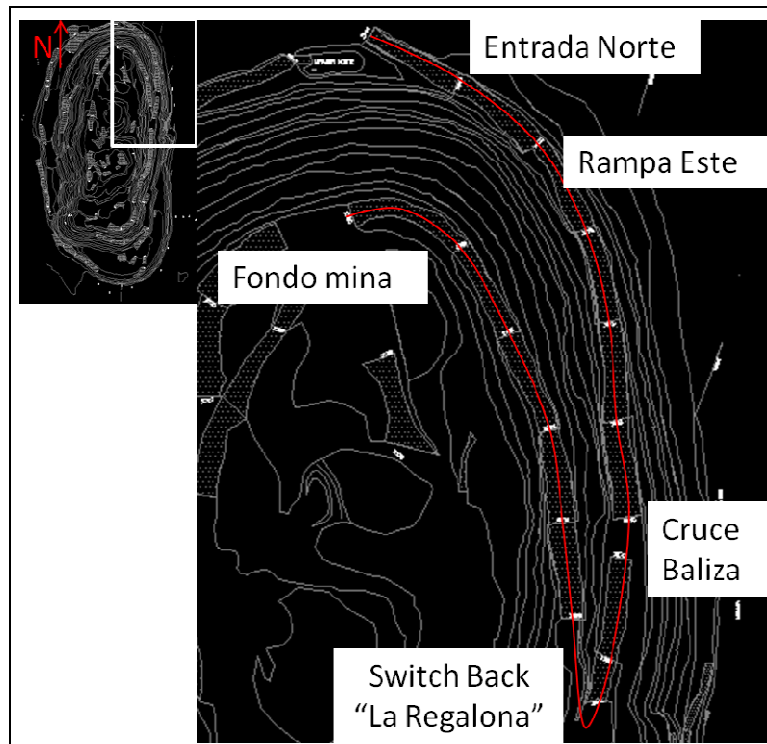


Ilustración 5: Ubicacion de Rampa Este

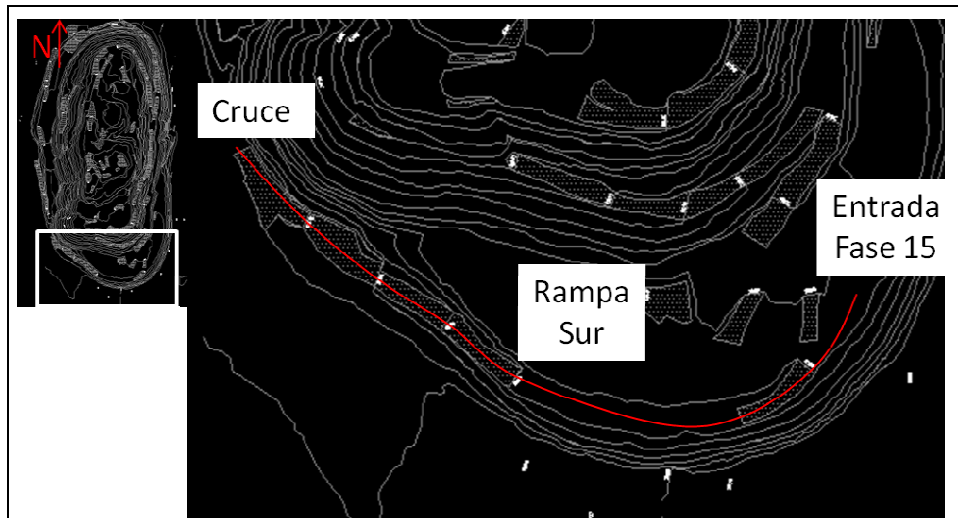


Ilustración 6: Ubicación Rampa Sur

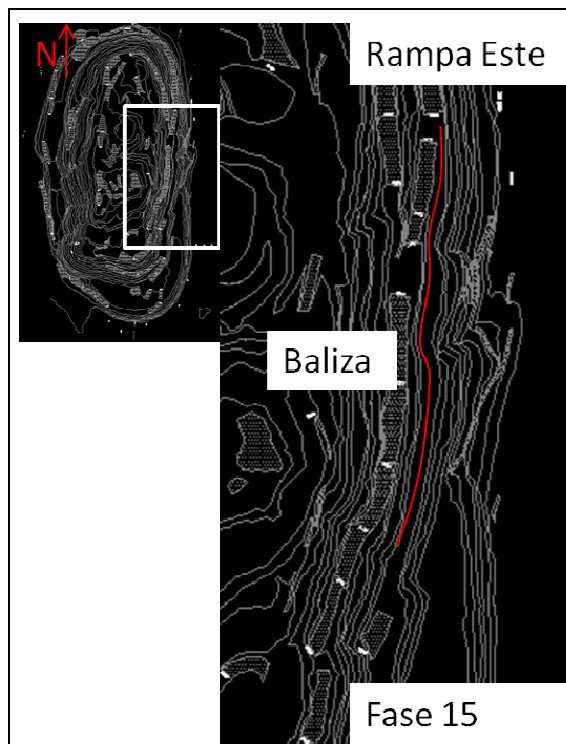


Ilustración 7: Ubicación Baliza

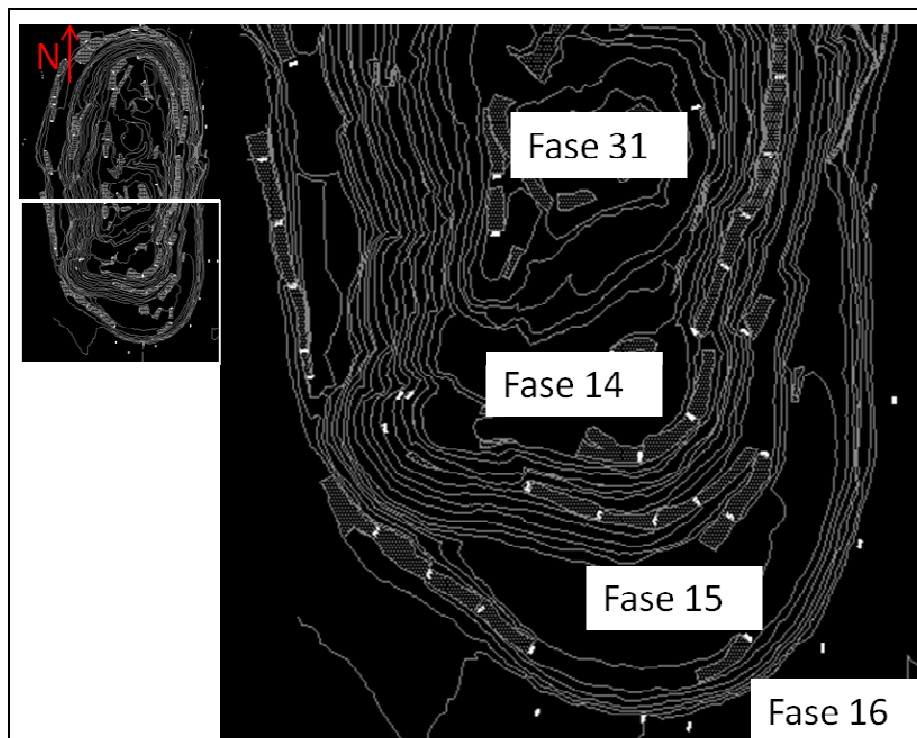


Ilustración 8: Fases en explotación

Las rampas presentadas están compuestas por las variables que en el desarrollo se detallarán mejor. Para la base y análisis de datos, se tendrán tramos de estas rampas estudiadas, siendo cada uno

asignado a una variable de diseño. La notación de estos tramos es tipo “Rampa – tramo”, por ejemplo: “Rampa Este – A”. A modo de simplificación se omite la palabra Rampa, quedando solo el nombre. Finalmente, la rampa sur, debido a que solo llega a la Fase 15, también se le denomina F15.

II.1.4 Sistema de turnos

El personal propio de la faena opera en diferentes sistemas de turno según el área o unidad donde desarrolla sus labores. Los turnos existentes en faenas son:

- Turno A: Considera jornadas de 12 horas de trabajo diarias, desde las 08:00 a las 20:00 hrs, durante 4 días seguidos, seguidos de 4 días de descanso.
- Turno B: Considera jornadas de 12 horas de trabajo diarias, desde las 20:00 a las 08:00 hrs, durante 4 días seguidos, seguidos de 4 días de descanso.
- Turno Administrativo: Considera jornadas de 9:36 horas de trabajo diarias, desde las 08:00 a las 17:36, durante 5 días hábiles.

II.1.5 Proyectos

En agosto 2008 comenzó la ejecución del proyecto Explotación Sulfuros Radomiro Tomic. Se trata de un sistema de chancado y traspaso de material para transportar minerales sulfurados del yacimiento Radomiro Tomic hasta las plantas concentradoras de Chuquicamata, ubicadas a 8,2 kilómetros de distancia. El movimiento de mineral diario será de aproximadamente 100 ktpd. Requiere de una inversión de US\$ 382 millones y, a partir de su puesta en marcha en mayo de 2010, producirá 160 mil toneladas de cobre fino anuales

Las obras e instalaciones principales del proyecto Explotación Sulfuros RT son una estación de chancado primario semi-móvil ubicada en las inmediaciones del rajo RT; una correa overland para el transporte de mineral que atraviesa tres puentes y dos túneles y será una de las más largas de su tipo en el mundo (8,2 kilómetros en un solo tramo), y un edificio de diseño cónico para el acopio de mineral (stock pile) desde donde seis alimentadores descargarán los sulfuros a dos correas de salida hacia las plantas de Chuquicamata.

Actualmente los sulfuros son extraídos de las fases mas profundas y enviados mediante camiones de extracción a Chuquicamata.

II.2 Consideraciones

II.2.1 Diseño

Dentro del diseño de una mina a cielo abierto existen varios parámetros mineros a considerar. Estos se determinan mediante características geomecánicas (como lo es el talud, o altura de banco), grado de selectividad requerido (altura de banco) y parámetros económicos (ley de corte, criterio para definir lo que es estéril y mineral, o razón estéril mineral que depende de esta misma ley de corte y las características del yacimiento). De estos parámetros, el que influye directamente en el estudio a realizar es el primero, relacionado con el ángulo de talud.

El ángulo de talud ayuda a determinar la cantidad de estéril que se debe mover para sacar el mineral. Generalmente es expresado como grados desde el plano horizontal.

En relación a la geomecánica se sabe que es necesario que las paredes del pit se mantengan estables durante la vida de la mina y por ende estas estabilidades deberían ser cuidadosamente analizadas. En un modo simple el talud debería ser constante en todo el depósito pero esto no siempre ocurre, pasando a una mina con distintos taludes según sectores.

El análisis de talud del pit (estabilidad) determina solo el ángulo que hay entre rampas. El talud global utilizado para diseñar debe permitir la existencia de rampas, por lo que es más bajo (horizontal) que el ángulo anteriormente analizado (Ángulo interrampa).

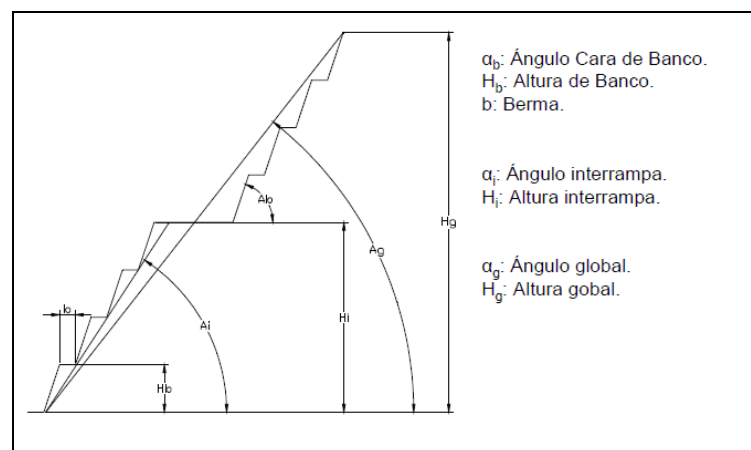


Ilustración 9: Esquema de talud global e interrampa

En el esquema que se presenta a continuación se tiene el caso de un pit diseñado con un cierto talud y después el cambio al cual es sometido debido a la operativización del pit (incorporándole las rampas). Por ejemplo se tiene un diseño con talud de 45° sin rampa. Luego, al sumar una rampa se tiene una disminución del talud total lo que conlleva un aumento de casi un 50% de tonelaje a ser removido. Para evitar esto se debe diseñar con un ángulo de 38° aprox (en este caso) lo que permitirá la existencia de una rampa con un ángulo de 45° interrampa.

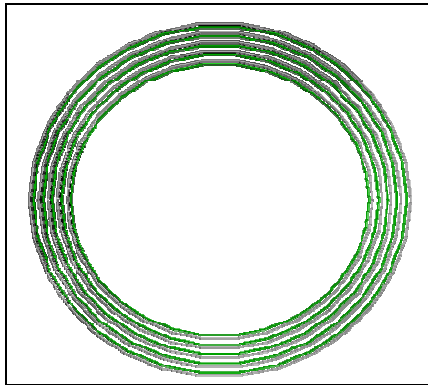


Ilustración 10: Talud sin rampa

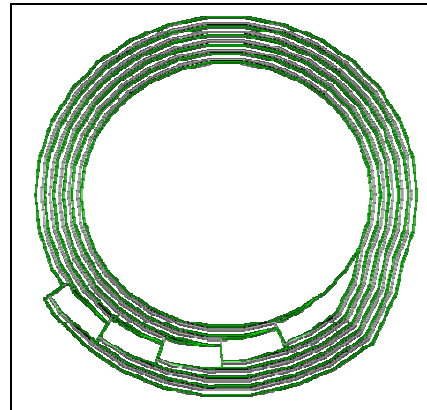


Ilustración 11: Talud con rampa

Los ángulos de talud deberían ser siempre lo más empinado posible con el objetivo de minimizar la razón estéril/mineral de acuerdo a Armstrong (1989).

Es importante saber que el diseño de una rampa afecta a la razón estéril/mineral y por ende al valor propiamente tal de la fase que se está explotando. Pero también afecta a la productividad de los equipos ya que la geometría de la mina debe asegurar que estos se desempeñen de buena forma en toda el área de la mina (rampas, frentes de carguío, cruces, áreas servicios, etc..). En el tema específico de las rampas, se debe buscar el mejor diseño con el fin de maximizar una función objetivo dada, por ejemplo, diseños amplios con mayor productividad pero de mayor costo vs diseños más estrechos con menor productividad pero de menor costo.

II.2.2 Planificación minera

La toma de decisiones en la industria minera está ligada a una serie de factores:

- Factores externos (competencia, mercado, etc..) en las cuales se tiene un control mínimo.

- Factores internos los cuales si están sujetos a una alta selectividad y control, como lo son los métodos de explotación, equipamiento y gestión.

Si se acota el problema al sistema de transporte, por ejemplo, se tienen los siguientes factores externos que no pueden ser variados:

- Ubicación de la operación
- Ley
- Mineralización

Y factores internos, en los cuales existe flexibilidad:

- Selección del sistema de transporte
- Equipamiento
- Ubicación de los botaderos, stocks, etc..

El objetivo de esta toma de decisión es seleccionar desde el set de factores controlables aquellas combinaciones que más contribuyen al crecimiento de la compañía.

Simbólicamente, optimizar $Z=F(X,Y)$ en donde Z es la función objetivo, F es el operador funcional, X son las variables controlables e Y las no controlables.

Luego, el paso a paso a seguir es el siguiente, planteado por Ramani (1989):

1. Identificar las variables controlables y no controlables
2. Definir la función objetivo
3. Establecer la escala de la función objetivo
4. Definir funcionalmente las relaciones entre variables controlables y no controlable
5. Finalmente los resultados se deben integrar en una escala de la función objetivo para tener un indicador y poder tomar decisiones en el futuro.

La finalidad del estudio a continuación presentado es dar un primer paso en encontrar variables controlables orientadas al diseño minero, tal que ayuden a crear una función objetivo que, optimizándola, pueda inducir a tomar decisiones buscando aumentar el valor de la empresa.

II.3 Cálculo de flota

II.3.1 Ejemplos literatura

Las siguientes metodologías compiladas y planteadas por Ramani (1989).

II.3.1.1 Simulación

La simulación de sistema de transporte en donde los sistemas de carga y descarga están ajustados para una cierta tasa de producción:

Z=Productividad

X=Variables controlables (Tipo de sistema, tamaño y número de equipos, perfil de rutas, condiciones, etc..)

Y=Variables no controlables (Sistemas de carguío y descarga y sus ubicaciones)

Objetivos relacionados con esto: Maximizar productividad de las flotas de camiones, minimizar tiempos de espera y maximizar utilización de todos los equipos.

En un sistema de transporte Pala-Camión, el tiempo de carga y la carga son variables aleatorias definidas por una función de distribución. El rendimiento del camión en una ruta es función de las velocidades (horizontal o pendiente en rampa), el perfil de caminos y condiciones. Los tiempos de viaje también son función del número y tipos de camiones en la ruta.

Luego el procedimiento es definir numéricamente las variables, los tiempos de carga y descarga, el tonelaje cargado, y tiempos de interferencia, con distribuciones estadísticas. Con esto es posible realizar una simulación de Montecarlo en la cual se evalúen todos los posibles casos y finalmente obtener producciones con cierta probabilidad de realización.

Algunos puntos importantes acerca de la simulación:

1. El objetivo de la modelación es crear abstracciones de la realidad en las cuales se pueden desarrollar experimentos. En modelos muy detallados las variaciones de los outputs pueden no ser manejables con el fin de cambiar los inputs, es decir, las relaciones de causa y efecto no quedan claramente establecidas. El objetivo principal debiese ser el capturar la esencia del sistema real.
2. Ningún modelo, sin importar lo detallado que esté, puede contener todas las observaciones.

3. Siempre es necesario tener información para el desarrollo y aplicación del modelo. De todas formas, la recolección de información no debiese ser un pre-requisito para la construcción del modelo.

II.3.1.2 Modelo de tiempos de ciclo para dimensionar flota

Para una unidad de transporte el tiempo de ciclo puede ser expresado como:

$$LCT=STL + LT + TL + STD + DT + TE + AD$$

En donde:

LCT=Tiempo de ciclo de la unidad

STL=Tiempo de maniobras

LT=Tiempo de carga

TL=Tiempo de viaje cargado

STD=Tiempo de maniobras en botadero o chancador

DT=Tiempo de descarga

TE=Tiempo de viaje vacio

AD=Tiempo promedio de demora (espera en botadero, espera en cargador, disminuciones de velocidad en la ruta)

También:

$$LT=TCP/LR$$

En donde:

TCP=Capacidad de la unidad de transporte (tons)

LR=Tasa de carga del equipo de carguío (tons/min)

Para sistema de pala-camión

$$LT=APROX.MAS(BCP/LR) \times CTL$$

BCP=Capacidad de pala (tons)

CTL=Tiempo de ciclo del equipo de carguío

$$TL=HD/SL \text{ y } TE=HD/SE$$

Donde:

HD=Distancia de transporte

SL=Velocidad de una unidad cargada

SE=Velocidad de una unidad descargada

Luego, asumiendo que no hay retrasos en el punto de vaciado o en la ruta se tiene que el número de unidades de transporte (flota) para saturar la unidad de carga es

$$N=\text{APROX. MAS}(LCT/(STL+LT))$$

II.3.1.3 Modelo probabilístico para dimensionar flota

Es común establecer que la flota total requerida es:

Flota=Número de camiones requeridos/Disponibilidad

Disponibilidad=(Horas Nom-Horas no disp.)/Horas Nom

Luego, si se requiere 16 camiones para mantener la producción y la disponibilidad es 80%, entonces el tamaño total de la flota es 20 camiones. Luego, para los requerimientos operacionales esta cifra es inadecuada de acuerdo a probabilidades:

P_n =Prob de que n unidades estén disponibles

P_a =Prob de que una unidad esté disponible

P_{na} =Prob de que una unidad no esté disponible=(1- P_a)

N=Numero total de unidades

$N C_n$ =Combinación de N sobre n

Según una distribución binomial presentada por Connel (1969, 1973) se tiene:

$$P_n = N C_n \times P_a^n \times P_{na}^{N-n}$$

O

$$P1n = \sum_{x=n}^N N C_x P_a^x P_{na}^{N-x}$$

Si se toma el ejemplo anterior es decir, que teniendo 20 camiones con disponibilidad de 80%, al menos 16 estén disponibles:

$N=20$; $n=16$; $P_a=80\%$; $P_{na}=20\%$

$$P_{16} = 20C_{16} 0.8^{16} 0.2^{20-16} = 0.2182 \text{ (Prob de que 16 cam estén disponibles)}$$

$$P_{16} = P(n \geq 16) = P_{16} + P_{17} + P_{18} + P_{19} + P_{20} = 0.6296$$

Es decir, la probabilidad de que al menos 16 camiones estén disponibles es solo de un 63%. Si se pide un 95% de probabilidad para que estén los 16 camiones entonces se requerirán 24 camiones.

II.3.2 Metodología actual usada por Codelco Norte

Actualmente se utiliza un modelo determinístico para la productividad de un camión cualquiera sea. Este modelo se basa en el “Modelo de tiempos de ciclo para dimensionar flota” con el objetivo de tener una flota nominal y posteriormente se aplican factores de disponibilidad y utilización efectiva con el fin de obtener la flota real requerida.

Lo que concierne al trabajo realizado es específicamente el tiempo de ciclo de los camiones orientado al tiempo de viaje (en donde las velocidades están involucradas). Para ello se muestra la importancia del tiempo de viaje dentro del ciclo.

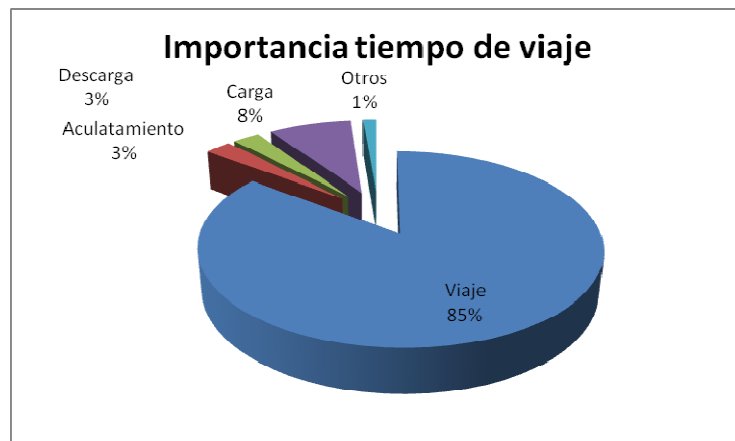


Ilustración 12: Importancia del viaje en el tiempo de ciclo

Esta relación se hizo en base a una ruta promedio de 6 km con 60% en pendiente, y con las velocidades utilizadas en la estimación actual.

Se observa el hecho de que el tiempo de viaje es por lejos el más importante en el ciclo del camión y por ende, mejoras tanto en la estimación como en la disminución de este pueden ser muy beneficiosas.

Dentro del tiempo de viaje es importante hacer notar que los esfuerzos deben centrarse en el recorrido que realiza el camión cuando va cargado ya que su influencia es mucho mayor (un 63% vs 22%)



Ilustración 13: Importancia de viaje cargado y vacío en tiempo de ciclo

CAPITULO III: BASE DE DATOS

III.1 Identificación de variables relevantes

Existen varios factores que pueden influir en las velocidades de los camiones de extracción y por ende en la productividad de todo el sistema de transporte. Dentro de estos existen factores propios del diseño, de la operación e incluso intrínsecos del camión (estado del equipo, antigüedad, etc..). En la sección anexos se detallan una serie de factores determinados a partir de la experiencia de cada una de las partes consultadas (operadores, despachadores, ingenieros operación y corto-largo plazo).

Luego, se presentan las variables que fueron consideradas como críticas según operaciones:

- Pendiente
- Ancho rampa (existencia de agostamientos)
- Switch-backs

- Cambios de pendiente
- Entrada de fase
- Condición de carpeta¹
- Condición de tráfico²
- Carga de camión³
- Cruces entre rampas
- Curvatura de la rampa
- Existencia de cruces de cables eléctricos (aéreos)

III.1.1 Definición de cada una de las variables

- **Pendiente:** La pendiente de la rampa influye directamente en la velocidad del camión debido a la fuerza gravitacional. El efecto se centra principalmente en el recorrido que hace el camión cargado cuando va subiendo (en horizontal las velocidades son similares).

En general la pendiente de una rampa es de aproximadamente 10% (Por cada 100 m recorridos, sube 10 m en la vertical), aunque pueden existir excepciones dependiendo de los requerimientos.

Para el modelo se considerará una velocidad en pendiente y otra en horizontal, diferenciando si es que se trata de un viaje vacío o cargado.

- **Ancho de rampa:** Esta variable es una de las más importantes dentro del negocio minero ya que su dimensión afecta directamente al talud de diseño de la mina y, por ende, a la cantidad de material a mover.

¹ Responsabilidad de operaciones, no se considera en el modelo

² Responsabilidad de operaciones, no se considera en el modelo

³ Responsabilidad de operador, no se considera en el modelo

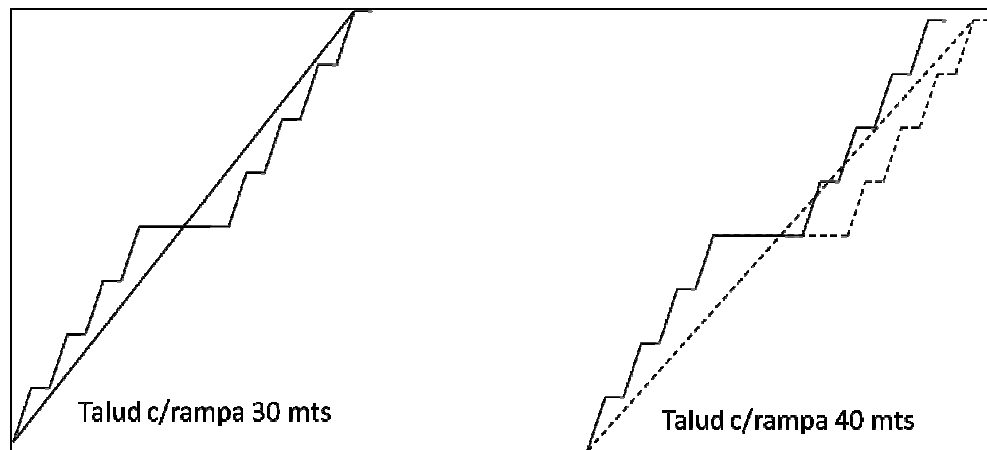


Ilustración 14: Ejemplo de cambio del talud de diseño en función del ancho de rampa

Operacionalmente la rampa debe asegurar que el movimiento de mineral y estéril se cumpla de acuerdo al programa de producción. Por esto el ancho depende de las características de los equipos que se van a utilizar (ancho de los equipos, velocidades entre flotas, flexibilidad, etc..).

En este sentido, más allá del ancho de la rampa, el problema que se presenta en la mina es el de las bajas de velocidad de los caex debido a los angostamientos de rampa presentes en la actualidad.

El problema de los angostamientos es que en la realidad no se diseñan (su aparición es dependiente de operaciones y de la ingeniería de corto plazo) pero si están presentes en la mina, y se considera un factor crítico por los operadores. Por lo tanto, es una variable que se considerará en el modelo ya que incluso en la planificación de largo plazo este efecto existe (fases futuras que utilizan rampas actuales) por lo que es de suma importancia entender este efecto.

A modo de simplificación se tiene la siguiente figura:

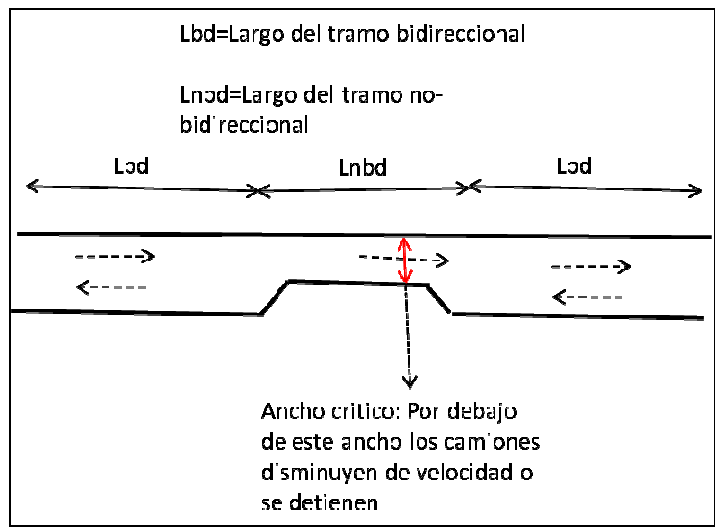


Ilustración 15: Esquema de bidireccionalidad de un tramo

Con esto se introduce el concepto de la bidireccionalidad de una rampa, que es la fracción de una rampa que se encuentra sobre un ancho crítico.

Luego se considerará una velocidad bidireccional (VBD) que es la velocidad en los tramos en donde no hay angostamientos, y otra no-bidireccional (VNBD) que es la reducción asociada a cada tramo con este efecto. Por simplificación, esta última se tomará como homogénea para todos los tramos estrechos.

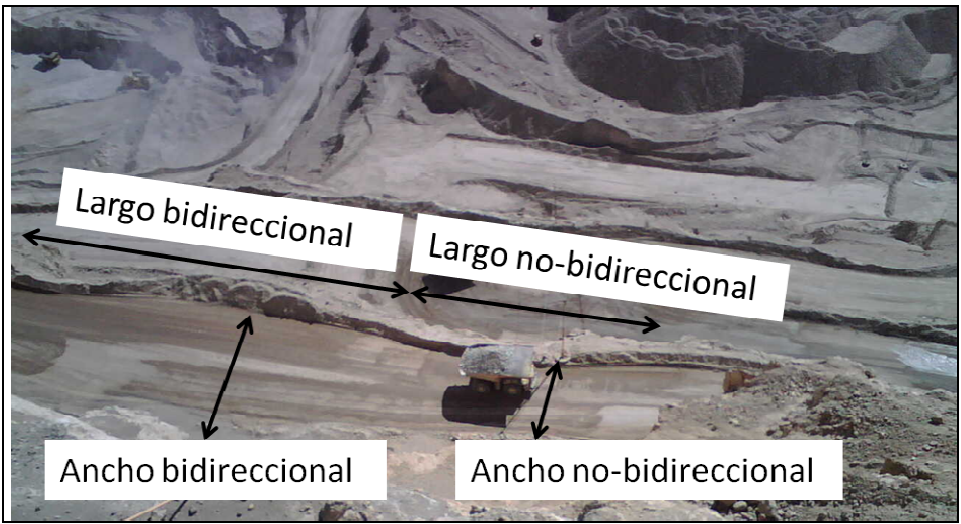


Ilustración 16: Ejemplo de bidireccionalidad de un tramo

- **Switch-backs:** Los switch backs son herramientas de diseño de rampa que permiten que el rumbo que tiene un camión cambie en 180° en la cota siguiente.

El giro al cual está expuesto el camión afecta principalmente a la velocidad cuando éste se encuentra bajando. También se debe considerar que existe una distancia de desaceleración y otra de aceleración.



Ilustración 17: Ejemplo de Switch back

- **Cambios de pendiente:** Los cambios de pendiente de una rampa afectan principalmente cuando el camión pasa de un estado de subiendo cargado (aproximadamente 12 km/h) a horizontal cargado (más de 40 km/h). Este cambio de pendiente es necesario considerarlo especialmente por la distancia de aceleración que tienen los camiones.



Ilustración 18: Ejemplo de cambio de pendiente

En este sentido, no se considera una ventaja el que exista un porcentaje de toda la rampa en horizontal si es que los cambios de pendiente son muchos.

- **Entrada de fase:** Las entradas de fase son tramos en el cual los operadores tienen precaución por el hecho de que hay mucho movimiento en el área de la fase (caex saliendo de la fase, equipos de carguío, auxiliares, etc..). Al igual que las dos variables anteriormente mencionadas se considera una distancia de influencia correspondiente a la desaceleración del camión.



Ilustración 19: Ejemplo de Entrada Fase

- **Cruces entre rampas:** Cuando existen bifurcaciones se da la situación que el equipo de transporte que no tiene la preferencia debe detenerse bajo ciertas condiciones de tráfico.



Ilustración 20: Ejemplo de cruce entre rampas

Estas detenciones son variables y dependen de muchos factores, como lo son las velocidades de los camiones en sistema, los flujos de camiones de ambas rampas (y por ende los ritmos de producción de las 2 o más fases involucradas). Para esto se debe simular, lo cual no está dentro

de los alcances de este trabajo, por lo que se omite esta variable del modelo. Esto no quiere decir que no sea un factor importante y que posteriormente se deba incluir en otro tipo de estudio (por simplificación puede calcularse un tiempo de interferencia en este tipo de rutas)

- **Curvatura de la rampa:** La presencia de curvas en la rampa tiene un efecto negativo principalmente sobre la velocidad de los caex cargados por 2 razones:
 - Precaución por tráfico y visibilidad
 - Por movimiento de la carga (posibles derrames de material en rampa o reordenamiento de la carga con influencia negativa sobre la estabilidad del camión).



Ilustración 21: Ejemplo de curva en rampa

Actualmente en la mina no se tienen rampas que tengan una curvatura considerable y solo se aprecian algunas en los comienzos de fase y dentro de las mismas fases. Las curvaturas de las rampas principales son de un gran radio por lo que no tienen gran influencia (conclusión obtenida en base a la experiencia con los operadores), luego no se considerarán en este modelo.

- **Existencia de aéreos:** Son las estructuras necesarias para que los cables eléctricos, que tienen que alimentar a las fases inferiores, pasen por las rampas sin generar condiciones sub-estándar. Están conformados por uno o dos postes y sus respectivas bases que tienen un radio de hasta 1.5 m. Los tipos de aéreos son:
 - Cerro-Poste: Se da cuando el cable tiene suficiente altura como para tensarse lo suficiente. Cuando hay de 4 a 6 bancos hacia la superficie de la mina.

- Poste-Poste: Generalmente se da cuando hay más de 6 bancos hacia la superficie de la mina (El peso se debe repartir entre 2 postes). Se da en otras situaciones (dentro de una misma fase por ejemplo) pero la amplitud de estos angostamientos no generan problemas en el ancho del paso de los camiones.

Si se tiene una rampa de 30 m se presenta la siguiente situación (con radios de base de poste de 1.5 m):

- Cerro-Poste:

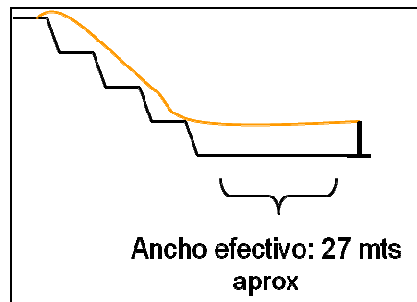


Ilustración 22: Esquema aéreo tipo cerro-poste

- Poste-Poste:

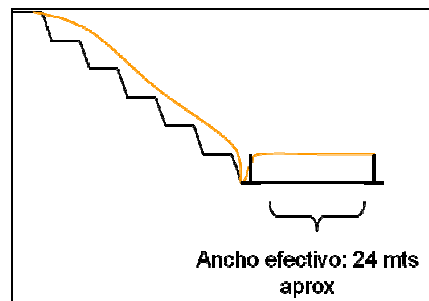


Ilustración 23: Esquema de aéreo tipo poste-poste

Si bien se sabe que existirá un aéreo dependiendo las fases inferiores, es difícil proyectar en donde se ubicará, así que no se considerará en el modelo. Lo que no impide que posteriormente se puedan hacer recomendaciones en base a este efecto (especialmente en el caso de los aéreos poste-poste, que generan angostamientos considerables en las rampas de 30 m)

Se concluye que el modelo abarcará 5 variables: Pendiente, Angostamientos(ancho de rampa), Switch-backs, Entradas de fases y Cambios de pendiente.

III.2 Generación de base de datos

Como se mencionó en la metodología, existen 2 maneras de obtener los datos que alimentarán esta base, cada uno con sus ventajas y desventajas. Para este estudio se consideró a la base de datos generada a partir de los GPS como la principal, y los datos medidos en terreno sirvieron para validar esta base de datos y para corroborar ciertas velocidades en las cuales se tenían dudas.

III.2.1 Validación de la información GPS

Para validar la base de datos GPS primeramente se procedió a tomar una muestra de datos en terreno. Se midió el tiempo de recorrido de algunos caex desde el mirador de RT (caseta de despacho), luego se midió, con topografía, la distancia asociada a estos recorridos y finalmente se rescató las velocidades de la macro de rutas (cuyo funcionamiento se explicará en el punto siguiente). El resultado es el que se presenta a continuación (camiones Komatsu cargados):

Ruta	Largo (m)	% en pendiente
Rampa Este - Fondo mina	2393	95%
Rampa Este - Switch Back	1315	100%
Rampa Fondo mina - Switch back	954	100%

Tabla 1: Rutas a estudiar para comparación

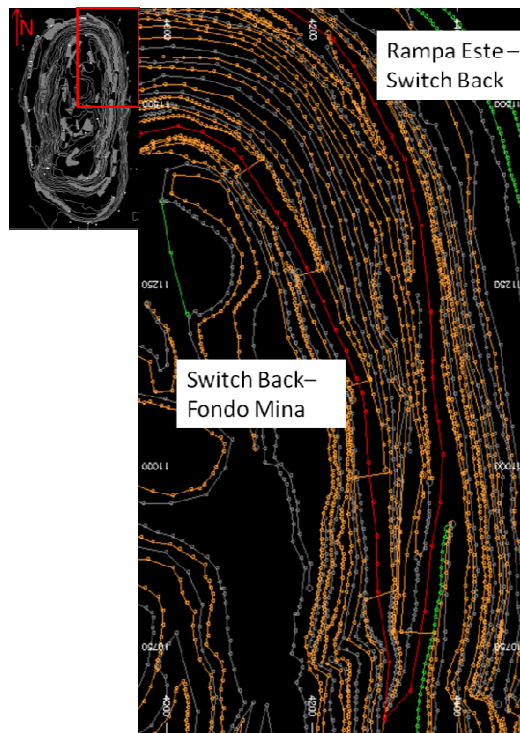


Ilustración 24: Rutas a estudiar para comparación (línea en rojo)

RUTA	Velocidad media (km/h)		Desviación estándar		Nº Datos	
	Terreno	GPS	Terreno	GPS	Terreno	GPS
Rampa Este - Fondo mina	10.6	11.3	0.9	1.7	23	108
Rampa Este - Switch Back	11.2	11.3	0.8	2.2	24	153
Rampa Fondo mina - Switch Back	9.2	10.6	0.8	1.2	24	152

Tabla 2: Comparación GPS vs TERRENO

Más allá de un análisis detallado, se busca verificar que el orden de magnitud de los datos entregados por los GPS sea similar al medido en terreno. Se sabe que la desviación de las velocidades GPS es mayor a la medida en terreno ya que el primero considera muchos más datos y por ende existen más fenómenos asociados.

Si consideramos las diferencias de las medias (aproximadamente 1 km/h) se concluye que la información de los GPS, filtrada por la macro de rutas, entrega datos confiables para lo que será la generación de base de datos para el modelo.

III.2.2 Velocidades extraídas por GPS

Para obtener la información correspondiente a las velocidades históricas de los caex se divide el proceso en 2 etapas:

1. Caracterización el sector a medir: Para esto se debe dibujar la ruta en un software tipo CAD en base a la topografía real de la mina (sin ningún tipo de ajustes). Luego se miden los anchos de las rampas obteniéndose como característica el ancho medio de la ruta, pero más importante aun, se obtiene el porcentaje de la ruta la cual tiene problemas de angostura. Finalmente, la información relevante para la velocidad es el largo de la ruta.
2. Extracción los tiempos de viaje de los camiones: Para esto se utiliza la base de datos de los GPS de los camiones y se programa una macro que pueda filtrar la información completa y obtener efectivamente los tiempos reales de viaje de los caex en ese tramo. Finalmente los puntos 1) y 2) se reúnen y se tiene la distribución de las velocidades de los caex en este tramo.

El cómo funciona esta herramienta se explica bajo los siguientes conceptos:

- Característica de la base de datos
- Filtro espacial
- Filtro temporal
- Ajuste final

III.2.2.1 Característica de la base de datos

La base de datos entregada por Modular contiene la información de tiempo-espacio de todos los equipos de la mina, por lo que se procedió a hacer consultas vía Unix, las cuales entregaran la información de los caex pertenecientes a las 2 flotas específicas a estudiar:

Liebherr T282	Komatsu 930E
487-494	120-130
840-850	801-839

Tabla 3: Código de los caex a estudiar

Luego, la información recolectada se presenta de la siguiente forma:

Tiempo	Cod_equipo	x	y	z
--------	------------	---	---	---

Tabla 4: Formato de base de datos

En donde “Tiempo” son los segundos transcurridos desde el 01/01/1970, “Cod_equipo” es el numero que identifica al equipo dentro de la mina y “x”, “y” , “z” son las coordenadas de los camiones.

Cabe destacar que estas coordenadas GPS utilizadas por los camiones son las mismas que se utilizan en topografía por lo que son concordantes a la hora de ubicar al equipo en la mina.

En general, y salvo contados casos, los caex están configurados para grabar la ubicación cada 30 segundos, lo que presenta una leve limitante para el análisis posterior, como lo es el estudio de rutas muy pequeñas. Con esta limitante, los tramos más pequeños que se pueden estudiar son de aproximadamente 300-400 m dependiendo de la velocidad de los caex en el sector.

El error asociado a los GPS está dentro de un metro en la horizontal lo que es aceptable. Luego, como se trabajará con curvas de nivel, la coordenada vertical no se considera tan importante, concluyéndose que la base de datos es confiable.

III.2.2.2 Filtro espacial

Al estudiar una ruta específica, se procede primeramente a considerar solo las coordenadas asociadas al inicio y final de la misma. Para esto se asoció un cuadrado (baliza) de 60 x 60 m con el objetivo de obtener una buena cantidad de datos. Este filtro se hizo utilizando consultas en el software Microsoft Access.

En la figura se presenta un esquema de cómo se filtran los puntos, es decir, el espacio que abarcan las coordenadas de inicio y final (cuadrados blancos):

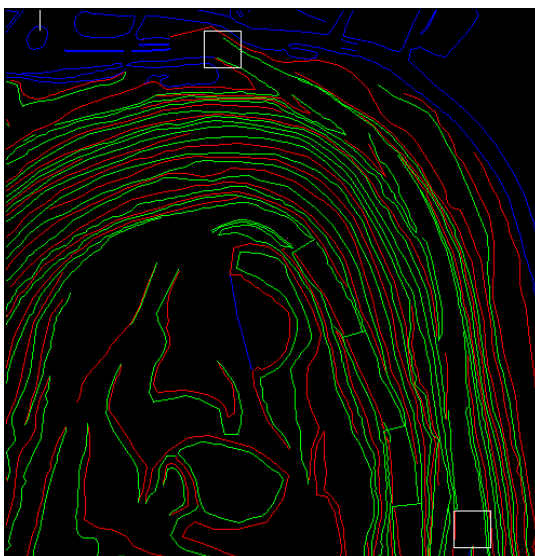


Ilustración 25: Esquema del filtro espacial

III.2.2.3 Filtro temporal

- Búsqueda de los puntos más representativos: Se refiere a la eliminación de datos cuando se tiene más de uno por baliza (por ejemplo, cuando el camión va muy lento se graban 2 o 3 datos por viaje en esa baliza, o cuando el camión está configurado para grabar su ubicación cada 1 segundo). Gráficamente se tiene la siguiente situación:

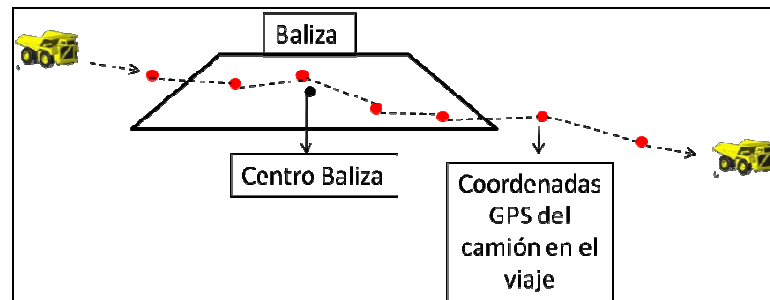


Ilustración 26: Esquema varios registros por baliza

Luego, de este viaje se selecciona solo el punto que corresponde al más cercano al centro de la baliza que es el más representativo del segmento a estudiar.

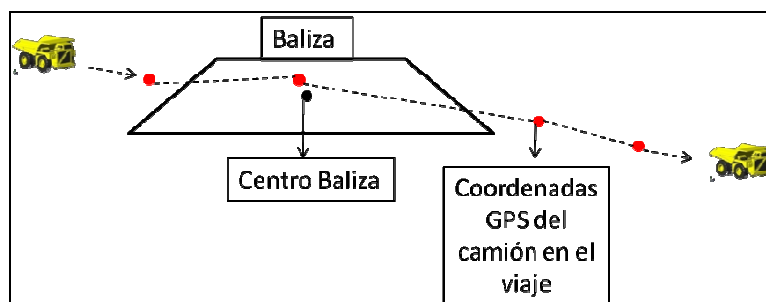


Ilustración 27: Esquema de filtro según registros por baliza

- Búsqueda de los tiempos de viaje: El último paso a seguir es encontrar la pareja de datos que representen efectivamente al viaje que realizó el camión. Esto debido a que, de acuerdo a la velocidad, la ubicación del destino puede corresponder a otro viaje. Para esto se ordenaron todos los datos de cada camión según su tiempo, luego se seleccionaron las parejas que sean origen-destino y luego, utilizando un criterio estándar, se selecciona si la pareja corresponde efectivamente a un viaje o corresponde a otro movimiento del camión.

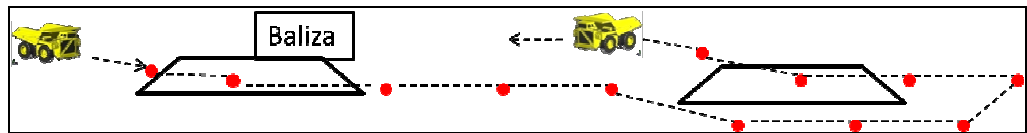


Ilustración 28: Esquema de tiempo de viaje erróneo

En la figura que se presenta se tiene el problema que el registro correspondiente a la baliza de destino es el viaje de regreso y por ende el tiempo asociado al viaje origen-destino no corresponde a tal.

El criterio utilizado está basado en las velocidades, es decir, de acuerdo a los largos de los segmentos a estudiar y velocidades extremas (de 8 km/h a 55 km/h) se tienen los tiempos límites de estos datos, obteniéndose un histograma que representa a los tiempos de este viaje.

Se puede esquematizar este filtro mediante la siguiente figura, es decir, se consideran solamente los datos que corresponden a la siguiente situación.

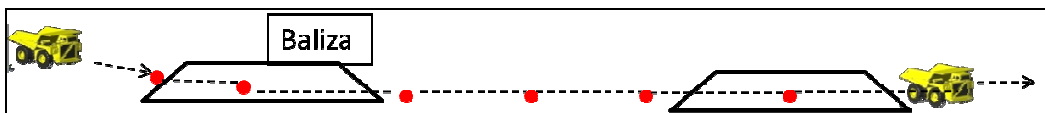


Ilustración 29: Esquema de datos ideales

III.2.2.4 Ajuste final

A modo de tener datos aún más representativos de las velocidades de los camiones en el tramo, se calcula en la macro el recorrido de los camiones en sus ubicaciones reales y no desde los centros de la balizas.

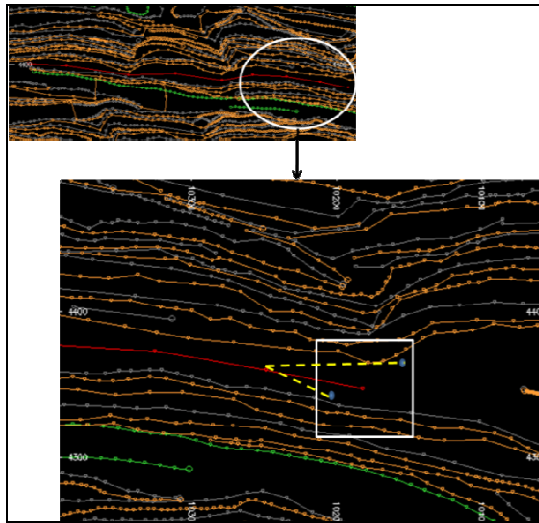


Ilustración 30: Esquema de ajuste en balizas

En la figura se tiene la línea roja que es el dibujo de la ruta en la topografía, y la baliza (cuadrado blanco). De la macro se obtienen las ubicaciones de los camiones dentro de la baliza (puntos celestes) y se calcula la distancia entre estas coordenadas y los puntos consecutivos del dibujo de la ruta (línea amarilla entrecortada). Luego, la distancia recorrida por el camión es la distancia entre puntos consecutivos más los ajustes de ubicación en cada baliza.

III.2.3 Mediciones en terreno

Como se mencionó anteriormente, las mediciones en terreno se utilizarán para despejar dudas que surjan del análisis de velocidades GPS.

El procedimiento es el mismo que se realizó para la toma de datos para validación del filtro GPS. Se tomaron tiempos desde el mirador de la mina RT (sector de Dispatch). Luego, para el cálculo de velocidades, se tenía una estimación visual de los orígenes y destino, que fue apoyada de tecnología GPS, con lo cual se pudo trazar el recorrido de los camiones junto a la topografía diaria.

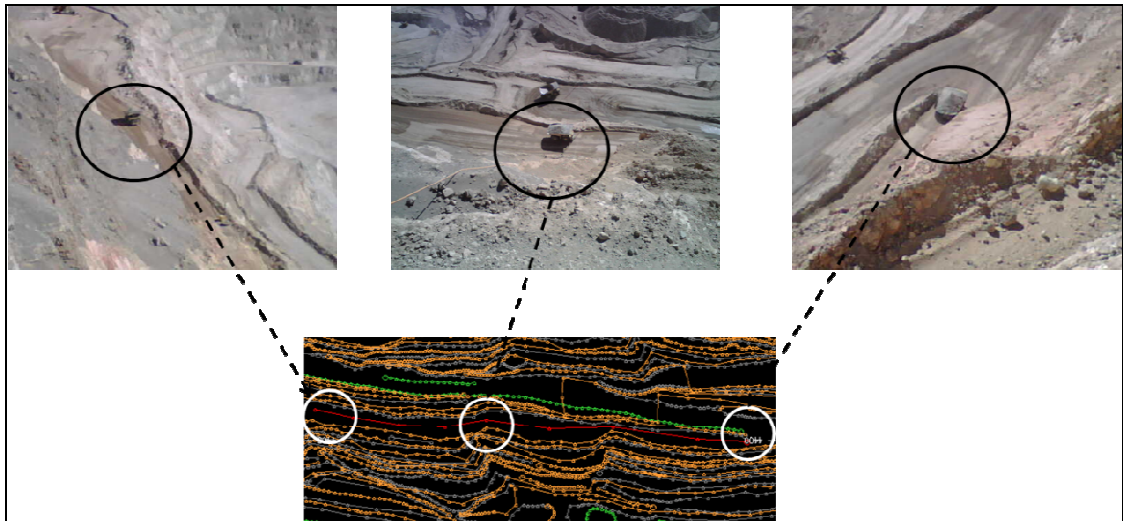


Ilustración 31: Esquema de medición de tiempos para sector baliza (ruta en línea roja)

Finalmente la base de datos extraída del GPS tiene la siguiente característica (para el mes de Septiembre) de cantidad de datos.

Mes	Flota	Total	Registros	
			Utilizados	Porcentaje
Septiembre	Komatsu	1,034,000	2,888	0.28%
	Liebherr	279,000	1,152	0.41%

Tabla 5: Comparación datos totales vs datos utilizados

III.3 Análisis de datos

Con la base de datos ya creada se procedió a analizar las velocidades para cada tramo. Para esto se debe tener en cuenta una serie de situaciones que se dan en la mina actualmente, dentro de las cuales se tiene:

- En los meses que duró el estudio, el despacho de la faena consideraba preferencia de la flota Liebherr para la Fase 15. Es decir, su tránsito principal se daba por la Rampa Sur.
- La velocidad de la flota Liebherr es superior a la velocidad de la flota Komatsu, diferencia que se hace notoria en el recorrido de los camiones subiendo cargados. Cabe tener en cuenta este factor para no asignar las bajas de velocidades de los Liebherr a otros eventos. Bajo este contexto, se tomó en cuenta el punto anterior, en el sentido de realizar un análisis de datos de las rutas en las cuales la flota Liebherr tenía asignación preferencial.

- Según reglamento⁴, las velocidades de los camiones tiene los siguientes límites.

Tipo de camión	Vacio-Cargado horizontal (km/h)	Vacio bajando (km/h)	Cargado bajando (km/h)
Liebherr T 282 B	64	39	20
Komatsu 930 E	64	39	20

Tabla 6: Máximas velocidades según reglamento

Pero el análisis previo no considerará este factor (si lo hará para la entrega del modelo final, que debe acotarse al reglamento).

- En los camiones existe una velocidad límite del motor, dada por fábrica y otro límite que es electrónico y es controlado por la faena. En este caso, los límites son de 55 km/h para los Liebherr y 60 km/h para los Komatsu. Luego, si en la base de datos se tienen velocidades mayores a las que puede obtener el camión, se eliminarán ya que corresponde a un error del filtro GPS o un error de la electrónica del equipo, que no se puede suponer que sea la regla.
- Cuando las velocidades sean bajas se tuvo el cuidado de no asignarlas a variables que no correspondan. Para esto se consideró la información proporcionada por los datos medidos en terreno y por la experiencia en la faena.
- Según reglamento, el tránsito de los camiones cargados tiene la preferencia (especialmente cuando se está en pendiente) por lo que la velocidad de estos no es afectada de forma importante por ninguna variable.

A continuación se procede a analizar la información relativa a cada una de las variables críticas que anteriormente fueron definidas.

III.3.1 Pendiente

La velocidad de los camiones en pendiente depende principalmente de la flota (potencia de los equipos, peso del equipo y de la carga). Esto es válido tanto en los viajes cargados como vacíos, pero en este último existe otro fenómeno (bidireccionalidad) que se analizará más adelante.

Antes de analizar las velocidades en pendiente se procede a estimar la pendiente crítica, en la cual el camión se comporta como régimen “en pendiente”. Para esto se tomó en cuenta la información técnica correspondiente a las recomendaciones de fábrica para cuando el camión hiciera el recorrido “bajando

⁴ Reglamento interno específico de operación críticas de minería, R-033 REGLAMENTO DE CARGUIO Y TRANSPORTE DE LAS MINAS DE CODELCO NORTE

cargado” (aunque se sabe que en la faena actual no se da la situación señalada, pero es necesaria la referencia).

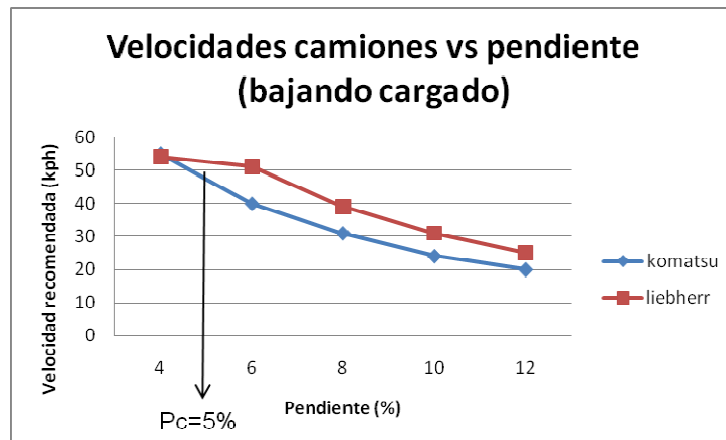


Ilustración 32: Velocidades recomendadas por fabricante para camión bajando cargado

De esta figura se rescata el hecho de que por sobre el 5% de pendiente, los camiones tienen otro comportamiento de velocidades, por lo que se considerará a toda velocidad de camión, sobre el 5% de pendiente como V_p (*velocidad en pendiente*) y a las velocidades en tramos menores a 5% como V_h (*velocidad en horizontal*). Este número es meramente referencial ya que en la actualidad los diseños se realizan solo con 0% (horizontal) y 10% (pendiente), y por ende no existen rangos de pendientes.

Como se mencionó anteriormente, la preferencia la tienen siempre los camiones que van subiendo-cargados, por lo que basta con tomar un tramo.

Se seleccionó el tramo AD de la Rampa Sur (Entrada a la Fase 15) para ambas flotas, considerando que existió una asignación preferencial en el periodo estudiado, para los camiones Liebherr, por lo que, aunque existió paso de camiones Komatsu, se minimizó el efecto de la menor velocidad de éstos.

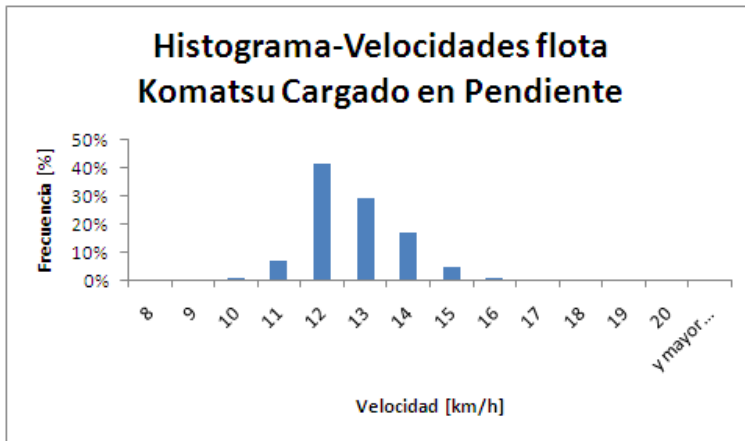


Ilustración 33: Histograma de velocidades Komatsu cargado en pendiente

Estadísticas	
Velocidad media (km/h)	12
Desviación estándar	1
Mínimo	9
Máximo	15
Cantidad de datos	920

Tabla 7: Estadísticas básicas para Komatsu cargado en pendiente

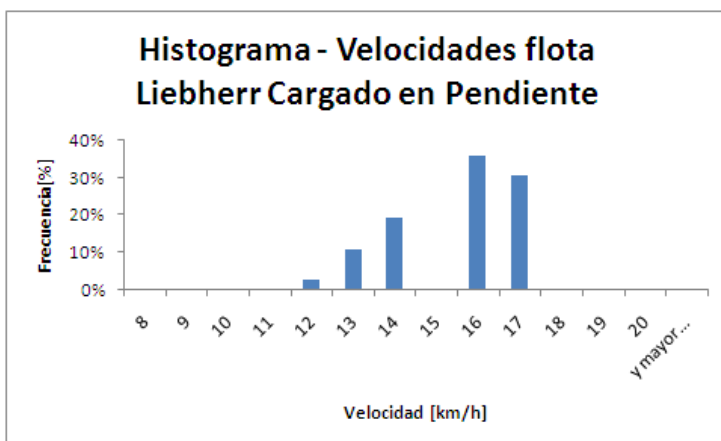


Ilustración 34: Histogramas de velocidades Liebherr cargados en pendiente

Estadísticas	
Velocidad media (km/h)	16
Desviación estándar	0.3
Mínimo	15
Máximo	17
Cantidad de datos	24

Tabla 8: Estadísticas básicas para Liebherr cargado en pendiente

En este caso, existen alrededor de 40 datos para el periodo en cuestión, pero el histograma denota una distribución con una concentración entre los 16 y 17 km/h y otras velocidades menores que es básicamente el efecto que anteriormente se quiso disminuir. Luego, la velocidad de los camiones Liebherr en un tramo en pendiente-cargado es la que se encuentra por sobre los 15 km/h, y el resto de los datos se explican por el efecto Komatsu.

III.3.2 Bidireccionalidad

El efecto de la bidireccionalidad (o angostura del camino) depende de muchos factores (como lo son el flujo de camiones, la distancia del tramo, etc..) pero se hicieron algunas consideraciones que permiten explicar el fenómeno de manera general:

- Se tomará en cuenta una velocidad bidireccional (VBD) que es la velocidad del camión en el tramo en donde no existen angosturas, y otra velocidad no-bidireccional (VNBD) que es la velocidad en el tramo angosto cuando el camión se encuentra con otro.

En la siguiente figura se muestran las velocidades de los camiones Liebherr bajando vacío, del cual se deduce la presencia de dos grandes fenómenos, que son los explicados anteriormente: Viajes en el cual no hubo baja de velocidad por los angostamientos (velocidades por sobre los 40 km/h), y otro donde si existió baja de velocidad (entre 28 y 34 km/h).

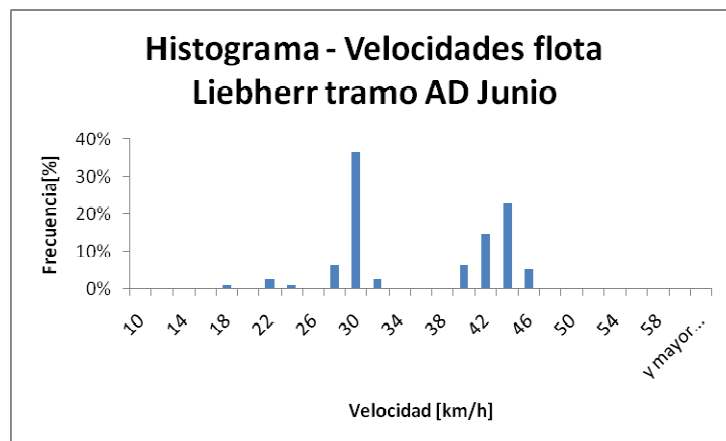


Ilustración 35: Histograma de velocidad para Liebherr en tramo AD F-15

Luego, la formulación propuesta es la siguiente:

$$Velocidad\ media\ \left(\frac{km}{h}\right) = \frac{D_c}{\frac{d_{ba}}{VBD} + d_{nba} \left(\frac{1-prob}{VBD} + \frac{prob}{VNBD} \right)}$$

En donde:

VBD: Velocidad Bidireccional (en este caso, sobre los 40 km/h)

VNBD: Velocidad no-Bidireccional (valor desconocido)

VBD: Velocidad bidireccional (en este caso, sobre los $40 \frac{km}{h}$)

VNBD: Velocidad no – bidireccional

D_t: Distancia total recorrida

d_{bd}: Distancia bidireccional

d_{nb}: Distancia no – bidireccional

[%BD]: Fracción del tramo con bidireccionalidad

prob: Probabilidad de encuentro entre camiones en los angostamientos

$$\text{Velocidad media} \left(\frac{km}{h} \right) = \frac{1}{\frac{[%BD]}{VBD} + (1 - [%BD]) \left(\frac{1 - prob}{VBD} + \frac{prob}{VNBD} \right)}$$

Es decir, las velocidades por sobre los 40 km/h son las velocidades medias de los camiones cuando prob=0, y las velocidades entre 28 y 34 km/h son las velocidades medias de los caex cuando prob=1.

De estos gráficos, la información importante a rescatar, junto a las velocidades, son los factores prob, que contiene la información de flujo de camiones de la ruta y se define como:

$$prob = \frac{n^{\circ} \text{ datos con problemas de angostamiento}}{n^{\circ} \text{ datos totales}}$$

Para el ejemplo:

$$prob = \frac{n^{\circ} \text{ entre } 28 \text{ y } 34 \text{ km/h}}{n^{\circ} \text{ datos entre } 28 \text{ y } 34 \frac{km}{h} + n^{\circ} \text{ datos sobre } 40 \text{ km/h}} = \frac{50}{50 + 54} = 48\%$$

La información completa correspondiente a todas las rutas se puede consultar en la sección de anexos “Datos de velocidades usados como parámetros del modelo”.

- Los anchos de rampa utilizados para diseño son de 30 m, y los únicos presentes en la actualidad. Aún así es necesario determinar que ancho de rampa es el crítico a la hora de definir si es que existe o no el factor de angostamiento. Para esto se consideraron algunas rutas y se procedió como se muestra en el punto anterior, es decir, se estimaron las velocidades medias en base a la formulación propuesta con la información correspondiente a los datos reales.
- Luego de la estimación (cuyas tablas se pueden consultar en el anexo “Datos con los que se calculo el ancho bidireccional”) se calculó el error absoluto asociado y se procede a graficar. Este procedimiento se repite para varios anchos de rampa considerados críticos (26, 28, 30 y 32 m). Nótese que el estudiar anchos de rampa críticos implica que la fracción que se considera como bidireccional igual cambia. El error asociado a cada “ancho de rampa critico” es:

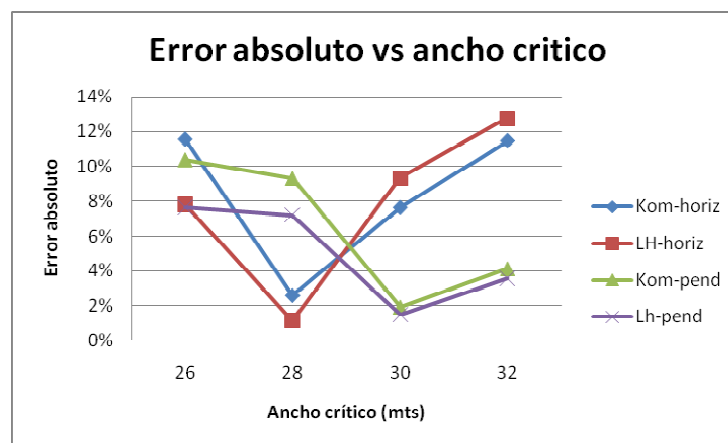


Ilustración 36: Errores absolutos vs ancho de rampa critico

Esto quiere decir que el ancho de rampa crítico que más se ajusta, según la formulación propuesta, es de 30 m para el caso de los camiones en pendiente y de 28 m para los camiones en horizontal. En otras palabras, todo ancho de rampa menor a los 30 o 28 m genera una baja en la velocidad para los recorridos en pendiente y en horizontal respectivamente.

Luego surge la interrogante de cómo se considerará en el modelo esta diferencia, para esto se tienen 2 opciones:

1. Ancho critico 30 m, para todas las rutas (asumiendo que existe un error asociado)

2. Ancho crítico diferenciado (30 en pendiente y 28 en horizontal) asumiendo la dificultad que tendría para el usuario del modelo el tener que hacer el cálculo de acuerdo a 2 anchos posibles.

Para despejar dudas se procedió a estudiar una ruta de ejemplo (Rampa Este, conexión con baliza para Komatsu bajando, periodo septiembre) en la cual se varió el ancho crítico en horizontal.

Largo (m)	% en Pendiente	Bidirección		
		pendiente	horizontal-30	horizontal-28
1750	55%	17%	23%	39%

Tabla 9: Características de la rampa ejemplo que se utilizó

Así se estimó la velocidad de la misma forma que en el punto anterior.

Error	
con 28	13%
con 30	11%

Tabla 10: Errores asociados según criterio utilizado

Luego, más allá de la diferencia de errores, se tiene un resultado similar y un orden de magnitud homogéneo. Esto hace suponer que el beneficio de utilizar como ancho crítico 30 m vs realizar el estudio comparado es mayor en el sentido de la simplificación para el usuario del modelo.

- Otro punto importante a considerar, que en la teoría no resulta tan obvio, nace de la inquietud acerca de las velocidades máximas (que para estos tramos es llamada VBD). Estas no resultan iguales para todos los tramos, siendo que la suposición era que la velocidad máxima a la cual llega el camión es siempre la misma, y que la variación es de la velocidad media, dependiendo de la bidireccionalidad y de las condiciones de tráfico presentes. Para entender el problema véase el siguiente ejemplo:

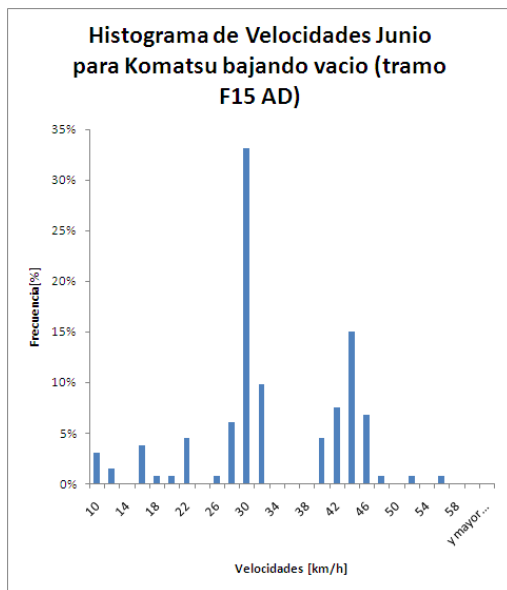


Ilustración 37: Histograma velocidades Junio para Komatsu bajando vacío tramo AD F-15

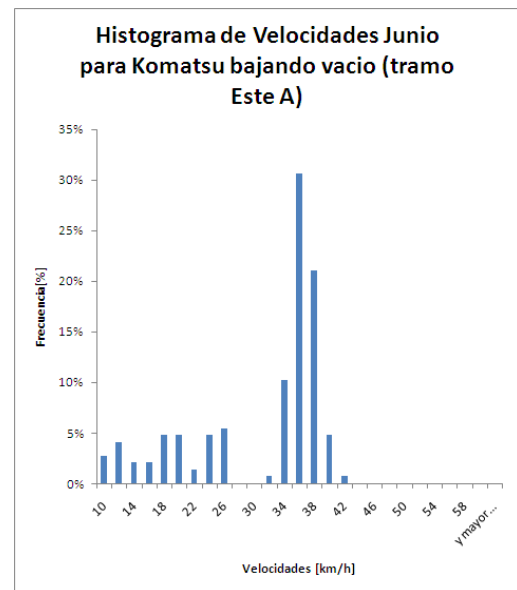


Ilustración 38: Histograma velocidades Junio para Komatsu bajando vacío tramo Este A

En estos gráficos se observa que a rampas de similares características (en el sentido de que no tienen otra variable que afecte, aunque sus flujos de camiones son distintos) las velocidades máximas alcanzadas son diferentes. Se logra en promedio 43 km/h para la rampa F15 AD y 37 km/h para Este A en el mismo periodo.

Esta duda se resolvió directamente en terreno, de la información de los operadores acerca de las precauciones que tienen con algunas rutas por el hecho de que tienen este problema de angostamiento, mas allá de que exista o no mucho tráfico.

La información proporcionada por operaciones es relevante ya que cualitativamente se tiene que la rampa F15 AD presenta una mejor condición desde el punto de vista de las angosturas (está bien lograda), no así la rampa Este que si tiene dificultades con los anchos.

Luego, se muestra a continuación las velocidades máximas en los tramos estudiados en función de la fracción bidireccional de estos.

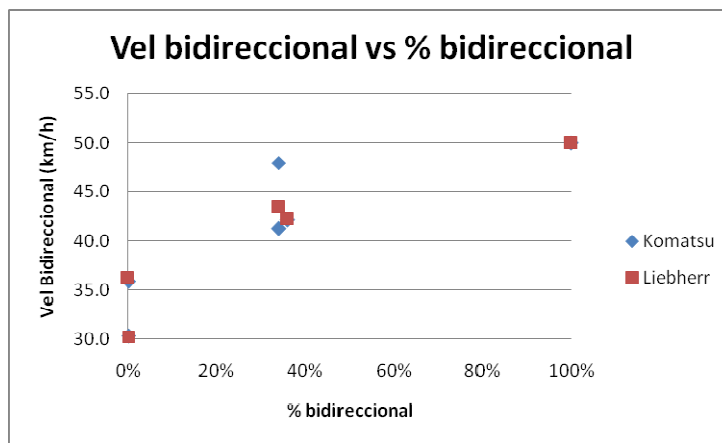


Ilustración 39: VBD vs [%BD] para ambas flotas

Aquí se observa una tendencia a disminuir la velocidad máxima alcanzable, a medida de que la bidireccionalidad disminuye.

En resumen, el angostamiento en las rampas afecta de doble manera:

1. Se disminuye la velocidad en los sectores estrechos
2. En los sectores que no son estrechos, las velocidades también se ven afectadas dependiendo del % bidireccional.

Esta dependencia se cuantifica con una curva de tendencia, siendo la que mejor ajusta la siguiente:

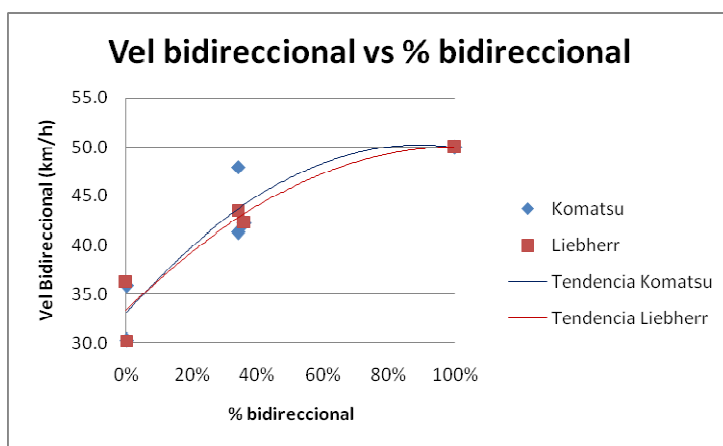


Ilustración 40: Tendencia de VBD según [%BD]

Factores		
VBD=ax ² +bx+c		
	KOM	LH
a	-21.5	-16.6
b	38.36	33.3
c	33.1	33.28
R2	84%	91%

Tabla 11: Factores para las tendencias de VBD

- La velocidad en angostamientos (VNBD) se deduce de la experiencia en terreno, más que de la estadística propiamente tal. Esto debido a que se busca la velocidad media en función de las otras variables y el problema yace en que para resolver esto se llega a una ecuación del tipo:

$$y = x_1 + x_2$$

En donde se quiere estimar "y" pero no se conoce "x₁" (una ecuación y 2 incógnitas).

Dada esta limitante se recurrió a tomar la experiencia de los operadores y se llegó al consenso de que 20 km/h es suficientemente representativo de las velocidades no bidireccionales de los camiones vacíos. En el caso de los camiones cargados, la velocidad si bien disminuye, también se considera que estos tienen la preferencia, por lo que la disminución es menor (como criterio experto se tomó 25 km/h).

- Debido a que la situación del punto 2 (dependencia de VBD en función del [%BD]) se repite solo para el caso de los camiones bajando vacíos, entonces se procedió a calcular la VBD de los camiones en horizontal (cargados y vacíos). Para esto, el tramo de mayor confianza es el denominado "baliza" ya que el otro tramo en horizontal "F15 B" tiene una condición de ondulación que hace que los camiones no lleguen a su máxima velocidad.

- Cargados

Flota	VBD (km/h)	datos
KOMATSU	44	48
LIEBHERR	44	40

Tabla 12: VBD para camiones en horizontal cargados (ambas flotas)

- Vacíos

Flota	VBD (km/h)	datos
KOMATSU	48	45
LIEBHERR	50	23

Tabla 13: VBD para camiones en horizontal vacios (ambas flotas)

III.3.3 Switch back

Esta variable de diseño se presenta en la actualidad en un solo sector de la mina (Sector denominado "La Regalona"). Esto presenta una dificultad para obtener datos ya que además presenta condiciones particulares:

- Área horizontal muy extensa (camión recorre mucho para dar el giro)
- Radio de giro pequeño
- Comienzo de la rampa inferior presenta un angostamiento de 17 m aproximadamente, por lo que los camiones que bajan se detienen por precaución (recordar que la preferencia la tienen los camiones subiendo).

Luego, en base a criterio experto de los operadores, confirmado por observaciones en terreno, se determinó que la velocidad media de los camiones bajando vacío en switch back es de 20 km/h, y la influencia en distancia de este fenómeno es de 200 m aproximadamente (considerando desaceleración en pendiente, giro en horizontal y aceleración en pendiente).

III.3.4 Entrada de fase

Si bien el diseño y concepto de entrada de fase es distinto al de un switch back, se observa que en la práctica, los operadores la enfrentan de manera similar. Esto quiere decir, las velocidades son las mismas y la distancia de desaceleración, y entrada propiamente tal, es idéntica por lo que se considerará la misma información: Velocidad de entrada fase 20 km/h y largo de influencia 200 m.

III.3.5 Cambios de pendiente

En terreno se determinó que es crítico el tema de los cambios de pendiente, especialmente cuando el camión va cargado subiendo y pasa a un régimen de rampa horizontal, ya que para tomar la velocidad denominada “horizontal” se requiere de una distancia de aceleración.

El cálculo propuesto es simple y se basa en la diferencia de velocidades:

Flota	Velocidad inicial	Velocidad final	Promedio (km/h)
Komatsu	13	46	29
Liebherr	17	46	30

Tabla 14: Velocidades relativas a la aceleración de los camiones (ambas flotas)

La distancia de aceleración se determinó junto al operador, en el equipo, donde se tiene el contador de kilómetros recorridos. Luego, las distancias de aceleración son las siguientes:

Flota	Distancia aceleración(m)
Komatsu	200
Liebherr	250

Tabla 15: Distancias de aceleración para ambas flotas

Para este estudio no se consideró importante el cambio de un régimen horizontal a pendiente ya que la disminución de velocidad ocurre en una distancia menor(no mas de 150 m).

CAPITULO IV: CONSTRUCCION DEL MODELO

Como se mencionó en el capítulo de metodología, el modelo ponderará las velocidades de cada uno de las variables por su distancia de influencia.

También se tendrá en cuenta el hecho de que las flotas tienen características distintas y que los viajes cargados y vacíos tienen consideraciones distintas. Estas últimas se detallan a continuación:

- Cargados
 - En la faena no existe el caso de camiones bajando cargados, por lo que no se consideró. Sí se puede dar fuera de la mina (botaderos), pero no se incluye en el modelo.
 - Los camiones cargados tienen la preferencia (especialmente en pendiente).
 - Los Switch backs no influyen cuando los camiones van subiendo cargados.
 - Las entradas de fase tampoco influyen (En este caso sería salida de fase).
 - El factor de aceleración (cambio de pendiente) es importante a considerar. Para esto, a la distancia total horizontal se le resta la distancia de aceleración, según la cantidad de cambios de pendiente que tenga.

- Vacíos
 - Los camiones vacíos son afectados por la preferencia de los cargados (tanto en horizontal como en pendiente).
 - Los Switch backs y Entradas de fase influyen en este modelo.
 - Por las magnitudes de las velocidades, los cambios de pendiente no son notorios.

Luego, se recuerda que la forma de la velocidad media de un caex está dada por la relación:

$$Vel \left(\frac{km}{h} \right) = \frac{Distancia\ total}{Tiempo\ total} = \frac{D_c}{\sum t_i}$$

Donde

D_c [km]: Longitud total de la rampa (recorrido del caex)

t_i [h]: Tiempos en el cual cada caex recorre un tramo caracterizado por V_i y d_i , que son las velocidades y distancias del tramo "i" (que es un tramo en donde existe una variable critica anteriormente definida).

La formula final que se obtiene es:

$$Vel \left(\frac{km}{h} \right) = \frac{D_t}{\sum \frac{d_i}{V_i}}$$

Esta fórmula permite construir los submodelos de cada viaje (cargado o vacío)

IV.1 Cargado

Con las consideraciones anteriormente descritas se tiene la siguiente fórmula para la velocidad media en una rampa.

$$Vel_{cargado} \left(\frac{km}{h} \right) = \frac{D_t}{\frac{d_p}{V_{pc}} + \frac{d_h - ac \times d_{ac}}{V_{hc}} + \frac{ac \times d_{ac}}{V_{ac}}}$$

Donde:

D_t [km]: *Distancia total de la rampa*

d_p [km]: *Distancia del tramo en pendiente*

d_h [km]: *Distancia del tramo en horizontal*

d_{ac} [km]: *Distancia de aceleracion del camion (pendiente → horizontal)*

ac [u]: *Nº de cambios de pendiente (factor de aceleracion)*

V_{pc} [$\frac{km}{h}$]: *Velocidad en pendiente cargado*

V_{hc} [$\frac{km}{h}$]: *Velocidad en horizontal cargado*

V_{ac} [$\frac{km}{h}$]: *Velocidad en cambio de pendiente (subiendo cargado)*

Como se determinó con anterioridad, los angostamientos de la ruta (bidireccionalidad) afectan a los camiones cargados cuando se encuentran en horizontal. Es por esto que la velocidad en horizontal cargado se define como.

$$V_{hc} = \frac{d_h}{\frac{d_{bd}}{VBD} + \frac{d_{nbd}}{VBD \times (1 - prob) + VNBD \times prob}}$$

Como anteriormente se había definido $[\%BD] = \frac{d_{bd}}{(d_{bd} + d_{nbd})} = \frac{d_{bd}}{d_t}$ entonces la ecuación queda.

$$V_{hc} = \frac{1}{\frac{[\%BD]}{VBD_{hc}} + \frac{1 - [\%BD]}{VBD_{hc} \times (1 - prob) + VNBD_{hc} \times prob}}$$

Donde:

$VBD_{hc} \left[\frac{km}{h} \right]$: Velocidad bidireccional en horizontal cargado

$VNBD_{hc} \left[\frac{km}{h} \right]$: Velocidad no – bidireccional en horizontal cargado

$[\%BD]$: Fracción del tramo que es bidireccional

$prob[\%]$: Constante empírica, probabilidad de que los camiones se encuentren en los angostamientos

IV.2 Vacío

$$Vel_{vacío} \left(\frac{km}{h} \right) = \frac{D_t}{\frac{d_p - ef \times d_{ef} - \frac{sb \times d_{sb}}{2}}{V_{pv}} + \frac{d_h - \frac{sb \times d_{sb}}{2}}{V_{hv}} + \frac{sb \times d_{sb}}{V_{sb}} + \frac{ef \times d_{ef}}{V_{ef}}}$$

Donde:

$d_{sb} [km]$: Distancia de Switch – back

$d_{ef} [km]$: Distancia de la entrada de fase

$sb [u]$: N° de Switch backs

$ef [u]$: N° de entradas de fase

$V_{sb} \left[\frac{km}{h} \right]$: Velocidad en Switch back

$V_{ef} \left[\frac{km}{h} \right]$: Velocidad en entradas de fase

$V_{pv}[\frac{km}{h}]$: *Velocidad en pendiente vacío*

$V_{hv}[\frac{km}{h}]$: *Velocidad en horizontal vacío*

Cabe hacer notar que la distancia de influencia del switch back se distribuye en pendiente (aceleraciones) y en horizontal (giro) por lo que tanto a la distancia en pendiente como en horizontal se le resta parte de esta influencia. A modo de simplificación se consideró la mitad de influencia en pendiente y la mitad en horizontal.

Al igual que en el caso de los camiones cargados, las velocidades en horizontal se definen en función de la bidireccionalidad:

$$V_{hv} = \frac{1}{\frac{[\%BD]}{VBD_{hv}} + \frac{1 - [\%BD]}{VBD_{hv} \times (1 - prob) + VNBD_{hv} \times prob}}$$

$VBD_{hv}[\frac{km}{h}]$: *Velocidad bidireccional en horizontal vacío*

$VNBD_{hv}[\frac{km}{h}]$: *Velocidad no – bidireccional en horizontal vacío*

$[\%BD]$: *Fracción del tramo que es bidireccional*

$prob[\%]$: *Constante empírica, probabilidad de que los camiones se encuentren en los angostamientos*

Para el camión que baja vacío la formulación cambia levemente:

$$V_{pv} = \frac{1}{\frac{[\%BD]}{VBD_{pv}} + \frac{1 - [\%BD]}{VBD_{pv} \times (1 - prob) + VNBD_{pv} \times prob}}$$

$VNBD_{pv}[\frac{km}{h}]$: *Velocidad no – bidireccional en pendiente vacío*

$VBD_{pv}[\frac{km}{h}]$: *Velocidad bidireccional en pendiente vacío. Función de $[\%BD]$.*

Esta dependencia quedó determinada en el análisis de datos, por la ecuación tipo:

$$VBD_{pv}[\frac{km}{h}] = a \times [\%BD]^2 + b \times [\%BD] + c$$

IV.3 Calibración del modelo

Luego de tener el modelo construido, se consideraron rutas compuestas (de mayor largo que los tramos correspondientes al análisis de cada variable) las cuales sean representativas de los sistemas de rampas de la faena.

El procedimiento para generar estas rutas es el mismo que para construir la base de datos, es decir:

1. Trazado de la ruta a estudiar según la topografía de la mina, correspondiente al periodo en cuestión.
2. Filtro de los tiempos en la base de datos GPS, por medio de la herramienta programada.

Las consideraciones para realizar esta comparación son básicamente las mismas que se mencionaron en los análisis previos.

- Medición de datos en la Rampa Sur (Fase 15) para la flota Liebherr, ya que no tiene el efecto de la baja de velocidad producto del tráfico de camiones Komatsu (o existe un efecto mínimo).
- Como tramo más importante en la horizontal se consideró a la Baliza. Para la comparación de estos casos se tomaron otros periodos con el objetivo de no comparar el modelo con los datos reales usados en la alimentación de este.
- Si bien se puede considerar también la Rampa Este completa como un buen referente, se omitió este caso ya que existe el empalme de otra rampa (Baliza), la cual cambia el flujo de camiones según los programas de producción de la Fase 15. Esto influye en la probabilidad de encuentro en angostamientos por lo que entregará un valor poco confiable. A cambio de esto, se dividirá la rampa en 2 grandes tramos, cada uno con su propia condición de tránsito.
- No se pudo comparar, con la topografía actual, los cambios de pendiente, ya que el existente (Rampa sur – tramo B) tiene una condición de ondulación que impide a los camiones realizar la aceleración necesaria para retomar la velocidad.
- La rampa Sur (o rampa F15) se considerará en su totalidad como rampa en pendiente, aunque tenga un tramo de 400 m en horizontal. Esto debido a que, como se mencionó en el punto anterior, existe una pobre condición horizontal por lo que los camiones, si bien aumentan levemente la velocidad, por precaución no se comportan como si fuera un tramo en horizontal.

- La probabilidad de encuentro en angostamientos se estimó en base al periodo y la rampa que se está estudiando (si se utiliza una rampa que contiene tramos anteriormente estudiados, entonces se agrega la probabilidad extraída del tramo estudiado).
- Se incluyó en esta comparación la estimación de las velocidades de las rutas en base a los datos actuales.

Velocidades (km/h) usadas actualmente	
Horizontal vacio	47
Horizontal cargado	46
Bajando vacio	41
Subiendo cargado	11.3

Tabla 16: Velocidades utilizadas actualmente

IV.3.1 Calibración Komatsu

A continuación se presentan las características de las rutas analizadas, con el periodo correspondiente.

Rampa	Largo (m)	% en pend	Bidireccionalidad					
			pendiente	horizontal	prob	sb	ef	ac
F15-Julio	1464	100%	50%	27%	45%	0	1	0
F15-Agosto	1550	100%	42%	34%	38%	0	1	0
F15-Septiembre	1706	100%	49%	34%	29%	0	1	0
Este-cruce-Julio	968	100%	17%	100%	13%	0	0	0
Este-cruce-Agosto	968	100%	17%	100%	20%	0	0	0
Este-cruce-Sep	968	100%	17%	100%	17%	0	0	0
cruce-fondo-Julio	1210	88%	21%	58%	80%	1	0	0
cruce-fondo-Agosto	1210	88%	21%	58%	73%	1	0	0
cruce-fondo-Sep	1210	88%	21%	58%	66%	1	0	0

Tabla 17: Características de rutas comparadas para Komatsu

De la información filtrada (cuyas estadísticas básicas e información gráfica puede consultarse en sección Anexos) se calcularon los errores porcentuales de las estimaciones realizadas por el modelo y las realizadas con los parámetros actuales. Este error porcentual se estimó de la siguiente forma:

$$Error[\%] = \frac{Vel\ estimada - Vel\ real}{Vel\ real}$$

En las figuras siguientes se presentan los errores absolutos de las estimaciones.

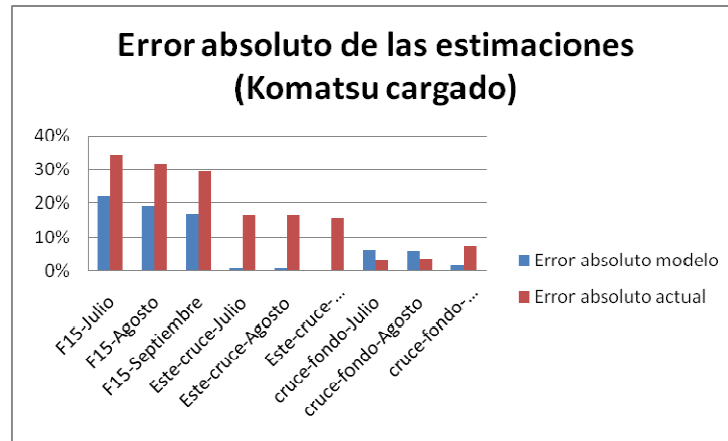


Ilustración 41: Errores absolutos para los Komatsu cargados

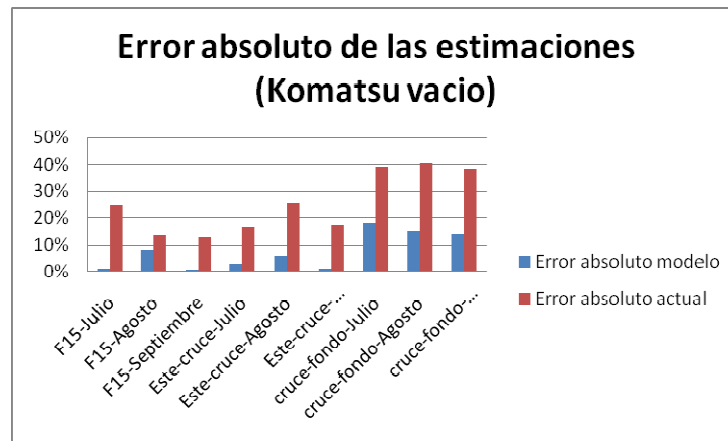


Ilustración 42: Errores absolutos para Komatsu vacios

Finalmente, a modo de tener una aproximación, se calcularon las medias de los errores absolutos con el fin de comparar ambos errores.

Resumen	Cargado	Vacio
Error absoluto modelo	8%	8%
Error absoluto actual	18%	25%

Tabla 18: media de errores de las estimaciones komatsu

IV.3.2 Calibración Liebherr

Para la flota Liebherr se consideraron las siguientes rutas y periodos.

Rampa	Largo (m)	% en pend	Bidireccionalidad					
			pendiente	horizontal	prob	sb	ef	ac
F15 Agosto	1550	100%	42%	34%	25%	0	1	0
F15 Septiembre	1706	100%	49%	34%	23%	0	1	0
Baliza-ago	748	0%	100%	9%	74%	0	0	0

Tabla 19: Características de rutas comparadas para Liebherr

Con esta información se tienen las siguientes comparaciones.

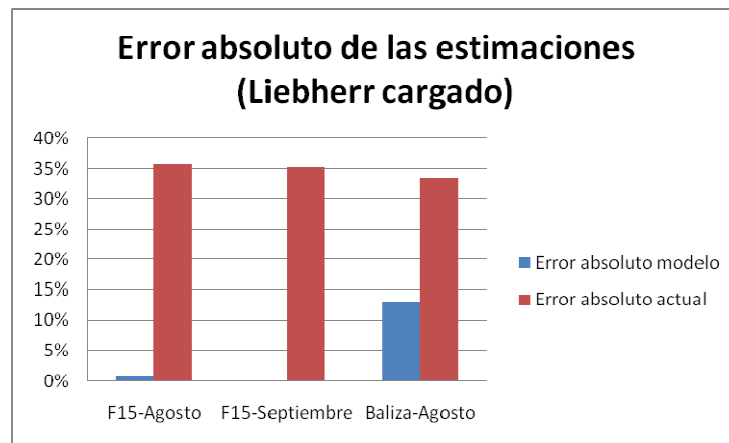


Ilustración 43: Errores absolutos para los Liebherr cargados

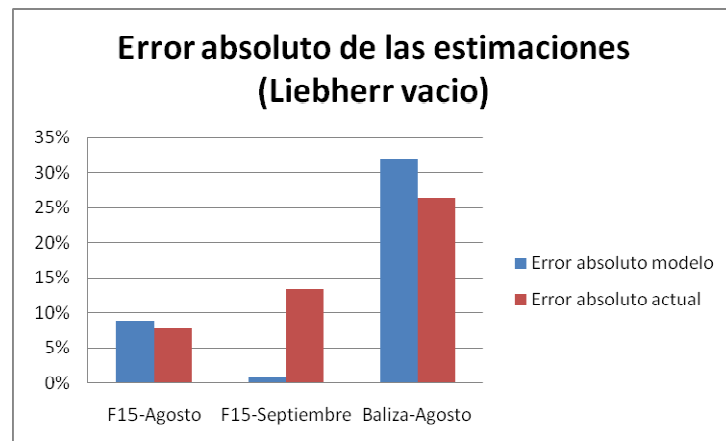


Ilustración 44: Errores absolutos para los Liebherr vacíos

Resumen	Cargado	Vacio
Error absoluto modelo	5%	14%
Error absoluto actual	35%	16%

Tabla 20: Media de los errores para las estimaciones Liebherr

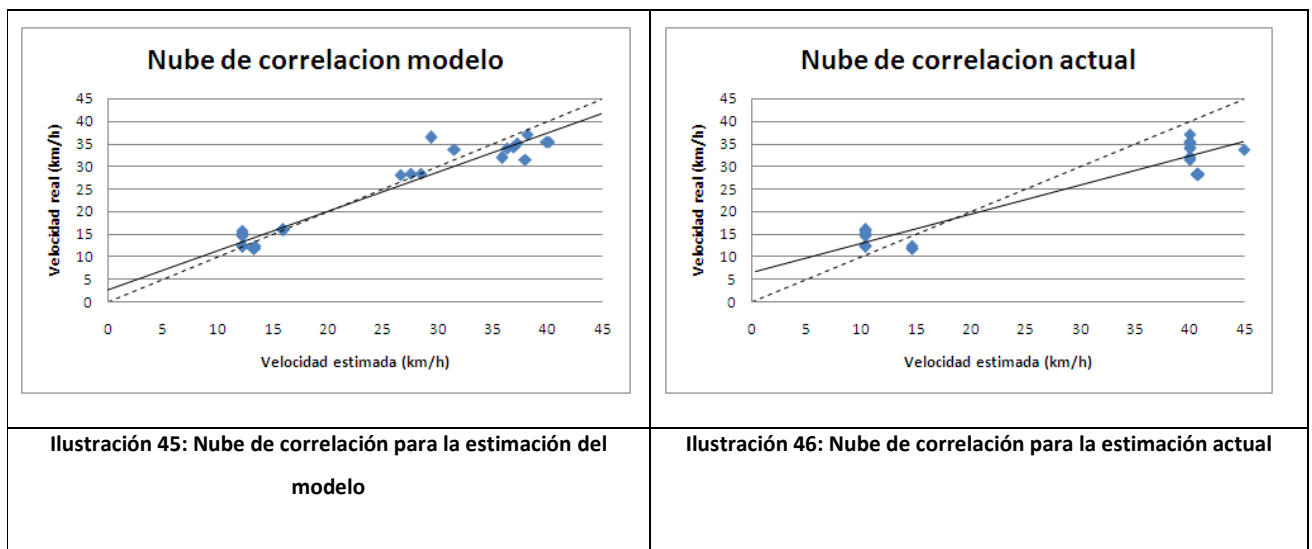
De acuerdo con los errores de estimación resultantes se infiere que el modelo entrega una mejor aproximación a las velocidades reales obtenidas en la mina, especialmente en el caso de los camiones cargados, que es de sumo interés por la gran influencia de este viaje en el tiempo de ciclo.

Se tienen algunos casos en los cuales la estimación actual es mejor que la del modelo, específicamente para los camiones Liebherr vacíos. En estos casos no se puede concluir que este submodelo mejora la estimación, pero tampoco se puede descartar su aproximación ya que es bastante similar a la actual.

IV.4 Análisis de resultados

Tomando en cuenta los errores medios de las estimaciones, se observa que existe una mejoría sustancial en el caso de la flota Komatsu vacío (17% de mejora) y los Liebherr cargados (30% de mejora). Para el caso de la flota Komatsu cargado, hay una mejora en la estimación de un 7% y en los camiones Liebherr vacío la diferencia es de un 2%, lo cual no permite ser totalmente concluyente de una mayor precisión en la estimación.

A continuación se presenta la correlación del modelo con las rutas anteriormente descritas.



En este esquema de gráficos (nube de correlaciones) se tiene otra herramienta para verificar el nivel de estimación del modelo. Se compara la recta que representa a la nube de la estimación modelo y la recta que representa a la actual.

En este caso, la línea de tendencia de mejor “pendiente” es la relacionada al modelo, ya que es la más cercana a la recta unitaria (línea entrecortada). Aún así existe una gran dispersión de estos puntos, lo cual castiga al modelo en el cálculo del coeficiente de correlación:

R2 de Modelo	R2 de Estimación actual
92%	94%

Tabla 21: Coeficientes de correlación de Pearson

Vale recordar que la correlación indica la fuerza y la dirección de una relación lineal entre dos variables, por lo que la conclusión preliminar que se obtiene de esta comparación es que la estimación actual es bastante buena en el sentido de representar la homogeneidad de la tendencia de la estimación, pero no así en reflejar la tendencia propiamente tal, la cual es representada por la pendiente de la recta en una nube de correlaciones.

Por otro lado, los errores presentados por la estimación actual son mayores a los correspondientes al modelo, y en resumen estos últimos no superan el 14% en general ni el 8% para el caso de los camiones cargados (que es el valor crítico del tiempo de ciclo).

Con esto se tiene un modelo de velocidades que se acopla bastante bien a las velocidades reales entregadas por los GPS de los camiones, en el sentido de entregar errores en torno al 10% y una correlación por sobre el 90%.

El error total de la estimación de velocidades está dado por la proporción entre flotas y entre tiempos de viajes (cargados y vacíos) ya que cada submodelo tiene un error asociado.

El comportamiento general es mucho mejor a la estimación actual, en términos de error asociado. Ahora, existen ciertas rutas en donde hay comportamientos distintos a la media y en estos es necesario buscar el fondo del error asociado.

- Komatsu

Existen diferencias especialmente en la Rampa Sur (F15) y en el tramo desde el fondo mina hasta el cruce de la Rampa Este. En el caso del primero se aprecia una estimación menor a lo que es el valor real, debido más que nada por la suposición realizada de que a pesar de tener un tramo en

horizontal, este presentaba una condición ondulada que hacía que los operadores no aceleraran. De igual forma, el error del modelo presenta una mejora a la estimación actual.

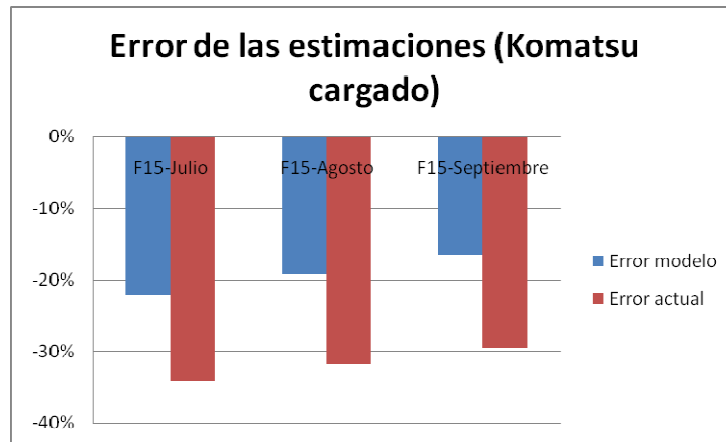


Ilustración 47: Errores reales de estimación (Komatsu cargado)

Para el caso de la Rampa Este – Fondo mina, la velocidad estimada actualmente se ajusta levemente mejor a la realidad que la estimación modelo. Observando bien los factores del modelo, existe una suposición que afecta de gran manera a esta rampa, que es la velocidad en horizontal cuando el tramo es pequeño. En este caso, omitiendo el tramo en horizontal que corresponde al switch-back, existen 50 m en horizontal en los cuales el camión cambia su velocidad muy poco, pero el modelo asume que cambia bastante (recordar que la velocidad en horizontal es del orden de los 42 km/h y que cuando se le agregó el factor de aceleración, el Komatsu asume 29 km/h). Claramente, este es un comportamiento que no está 100% explicado por el modelo por lo que es una de las fuentes de error asociadas. De igual forma, se debe considerar que la composición de una rampa promedio en la actualidad de RT comprende un largo de 6 km aproximadamente por lo que este error se minimiza.

- Liebherr

Para los camiones Liebherr la calibración se vio afectada por la cantidad de datos que se pudieron obtener. Dentro de las razones para no extraer más información de esta flota se encuentra en el hecho de que la flota es relativamente nueva y los GPS tienen un tiempo de acomodado. Además se tiene una flota pequeña en la cual las asignaciones influyen de gran manera. Este último punto también afecta al filtro GPS, que no registró todos los viajes que se realizaron y solo se pudo obtener un porcentaje de estos (difícil de definir).

El caso más crítico en este estudio es el de los tramos en horizontal. Esto debido a que solo existe un tramo de confianza en la mina (baliza), lo que se suma a los pocos datos obtenidos para Liebherr.

De igual forma se tiene un error menor en el caso de los camiones cargados (13% aproximadamente) en comparación con el error de la estimación actual (más de 30%). Y para los camiones vacíos, ambas estimaciones tienen un error por sobre el 25%.

Un tema a considerar es que si omitimos el análisis de los valores absolutos, se tiene una tendencia clara para este tramo y es la de sub-estimación de las velocidades en el caso del modelo (errores negativos) y la sobre-estimación por parte de la estimación actual.

Más que una fenomenología específica que explique este cambio (debido a la experiencia en terreno se concluye que no se tiene otro evento que perjudique a la velocidad), una fuente de error muy grande es la estimación de la probabilidad de ocurrencia de encuentros de camiones en angostamientos.

Como los errores asociados son bastante bajos (se considera un error aceptable en la empresa, para un modelo empírico, un 10%) no se procedió a buscar factores de ajuste o calibración.

Finalmente, se estima el error estándar de la estimación, para el caso de la estimación actual y estimación mediante el modelo propuesto:

$$\text{Error estándar} \left[\frac{\text{km}}{\text{h}} \right] = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 2}}$$

Donde:

$y_i \left[\frac{\text{km}}{\text{h}} \right]$: Valor real

$\hat{y}_i \left[\frac{\text{km}}{\text{h}} \right]$: Valor estimado

n : n° de datos

Bajo este criterio se tiene que el error estándar de la estimación actual es de 7 km/h y con el modelo propuesto es de 3 km/h con lo que se tiene una mejor estimación global por parte del modelo.

CAPITULO V: ESTUDIO CASO BASE

En el cálculo de flota de camiones se implementa el modelo con el fin de comparar estos resultados con las estimaciones actuales de flota. Para esto se tuvo en consideración los siguientes aspectos:

- Estudio del año 2011, correspondiente al plan sin desarrollo del 2010 (PSD-2010).
- Se estudian todas las rutas posibles, que están construidas en base al origen (fase-banco) y destino (tipo roca).
- Las rutas son obtenidas del software utilizado actualmente en la empresa (PlanR).
- Para las rampas actuales, que serán utilizadas el año 2011, se miden los anchos reales (de acuerdo a la topografía) con el fin de obtener una aproximación de los angostamientos presentes.

La metodología seguida en este estudio es creada de tal forma que pueda ser el primer paso para la implementación del modelo en el cálculo de flota de equipos. En este contexto, se construyó una planilla en Excel que pudiese leer las rutas de PlanR, haciendo compatible el cálculo de velocidades del modelo con el software actual.

V.1 Metodología

La metodología de cálculo de velocidad usada, que pretende ser la implementación misma, se detalla a continuación:

1. **Extracción del programa de producción del año estudiado (en este caso 2011) del PlanR.** El objetivo de este paso es tener los tonelajes que se moverán en cada banco, que a su vez representa una ruta por lo que en realidad es el tonelaje que se moverá por esa ruta. Luego, los tiempos de viaje que se tienen en cada ruta serán ponderados por este tonelaje/ruta para tener el tiempo de viaje medio del periodo.

La forma de extracción del PlanR es la siguiente:

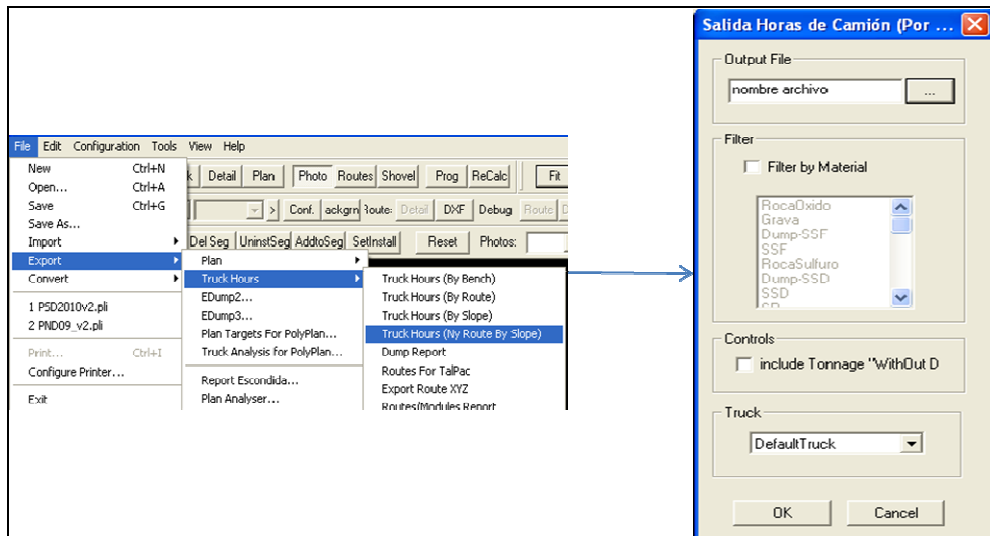


Ilustración 48: Exportacion de movimientos mina en PlanR

Este es un archivo .csv que debe ser pegado en la planilla “VELOCIDADES FINAL” en la pestaña “movimiento periodo”, para que el resultado sea el siguiente.

	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	
1	Año	Fase	Banco	Roca	Destino	TONELAJE	HR/CAEX	dist an	banc	horiz	in pit	sub in pit	ba in pit	horizdump	sub dump	ba j dump	dist total
2	2011	809	2885	RocaOxido	Bot_2_pesto b2-m2-3 (Bot	3871005.7	5637.7	257.3	234.5	895.5	0	752.8	1224.9	0	3365.1		
3	2011	831	2630	Stx-5P	St_sul_1_no 3080-2 (St_x	493850.2	1483	175.8	2098.7	3429.9	0	982.4	1653.4	20.1	8360.3		

Ilustración 49: Formato ingreso movimiento a planilla de velocidad

- Exportar todas las rutas del periodo.** De acuerdo a lo estudiado, en la actualidad es difícil obtener un solo archivo que contenga a todas las rutas posibles. Esto limita a la implementación, ya que para obtener estas rutas se procede de una forma poco amigable al cliente. La forma de hacerlo es mostrar en pantalla el banco a estudiar (photo→Bncl→Fase→Banco):

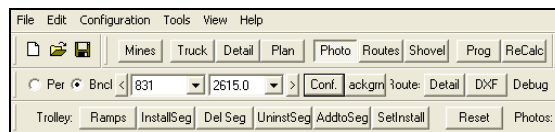


Ilustración 50: Eleccion de origen a exportar en PlanR

Luego, de acuerdo a la planificación, se muestra la ruta del tipo de roca a mover (que determina el destino).

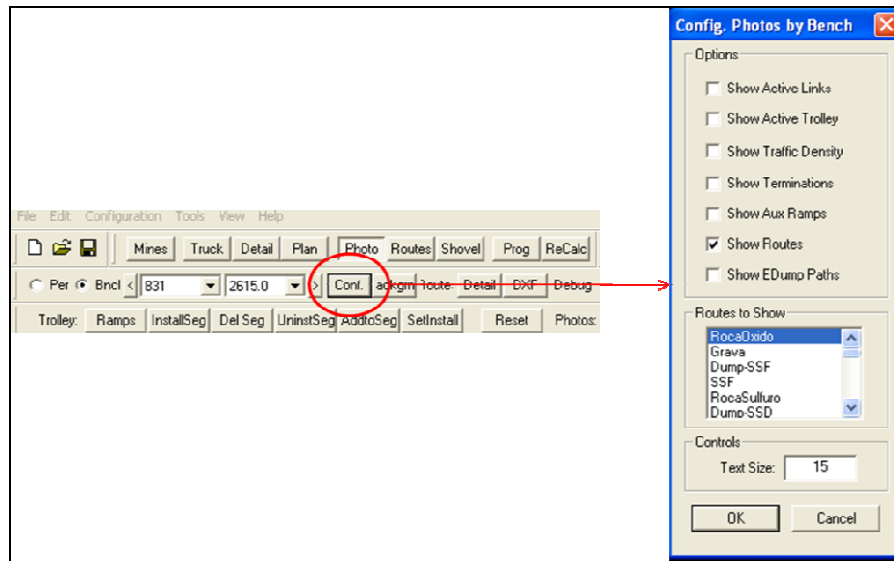


Ilustración 51: Eleccion de destino a exportar en PlanR



Ilustración 52: Visualizacion de ruta a exportar en PlanR

Finalmente se exporta un archivo .csv que contiene toda la información mostrada en pantalla.

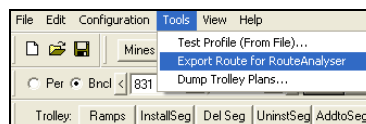


Ilustración 53: Exportación de ruta en PlanR

Al guardar el archivo, no se debe cambiar ningún nombre, ya que la planilla lee el nombre del archivo que por default guarda PlanR. Este paso se debe repetir para todas las rutas del periodo y se debe guardar en una sola carpeta.

3. **Obtención anchos reales.** Para tener una medida de angostamiento de la rampa se procede a medir los anchos reales de aquellas que serán usadas en el periodo estudiado y que ya están construidas, es decir, no habrá mayor variación de estas.

Para esto se procede a usar una herramienta tipo CAD (Vulcan, Autocad, etc..) en la cual se pueda medir los anchos de las rampas. El procedimiento es sencillo y consiste en exportar todas las posibles rutas que contiene el PlanR, en un archivo .dxf y luego se procede midiendo los anchos de rampa en los puntos en donde existan nodos de ruta.

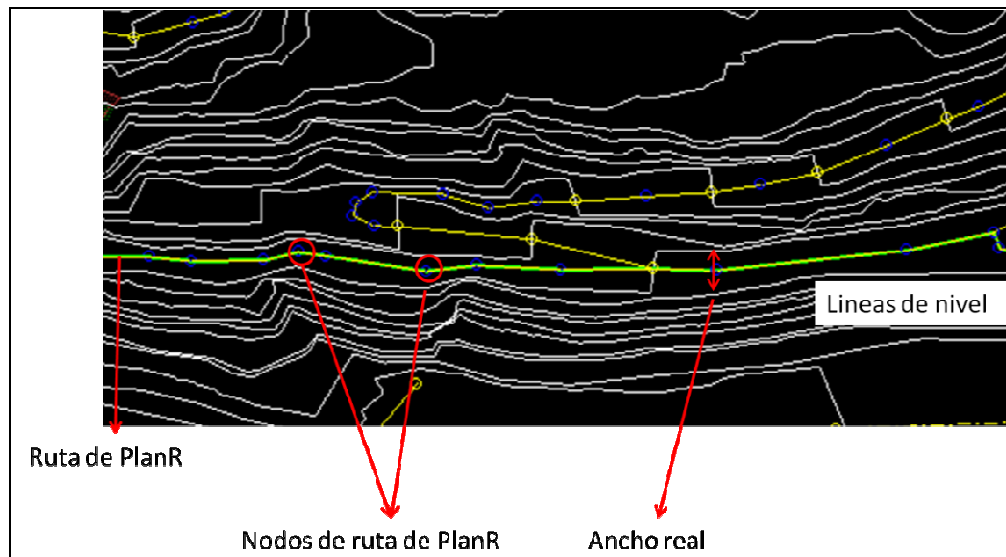


Ilustración 54: Medicion de anchos reales

Es importante hacer notar que al momento de dibujar la ruta en PlanR, se debe procurar ubicar nodos en los puntos en donde existan angostamientos para que la planilla registre este efecto.

Luego, se deben ingresar estos puntos a la pestaña "anchos reales" de la planilla "VELOCIDADES FINAL".

x	y	z	ancho	ancho ajustado	línea	x	y	z
4365	10312	2855	33.8	23.8	no	4365	10312	2855

Ancho medido
Coordenadas del nodo asociado

Ilustración 55: Formato ingreso de anchos reales en planilla

4. Ya realizados todos estos pasos se procede a abrir la planilla “VELOCIDADES FINAL”, que debe estar en el mismo directorio en donde se guardaron los archivos de ruta.

En esta, se debe seguir el procedimiento detallado en la pestaña “CONTROL”.

CALCULO DE VELOCIDAD SEGÚN DISEÑO DE RAMPA

- 1.- Exportar todas las rutas del periodo estudiado (desde PlanR, guardar en una misma carpeta)
- 2.- Guardar la Macro en la misma carpeta de las rutas
- 3.- Pegar en pestaña "movimiento periodo" el plan exportado en PlanR
- 4.- Insertar los anchos reales en pestaña "anchos reales"
- 5.- Importar archivos de rutas Importar
- 6.- Eliminar del listado de archivos (pestaña "archivos ruta") todos los que no son corresponden a las exportaciones
- 7.- Extraer y Pegar nodos de ruta ("nodos" --> "carac ruta") Extrae y Pegar
- 8.- Eliminar de "carac ruta" todas las rutas que tienen Largo=0
- 9.- Asociar anchos reales ("anchos reales" --> "carac ruta") Anchos reales
- 10.- Calculo de tiempo de viaje Calculo Velocidad

Tiempo de viaje medio		
Komatsu	22.9	mins
Liebherr	20.2	mins

Ilustración 56: Planilla de calculo de tiempos de viaje

Esta macro lee los archivos de cada ruta, y luego extrae los puntos que corresponden a los nodos de esta. Cabe hacer notar que en estos archivos no solo hay puntos de rutas, sino que está toda la topografía. En resumen, la macro extrae solo la información asociada a la ruta.

Luego, ordena estos puntos en la pestaña de características de ruta en donde se obtienen los inputs para el modelo y finalmente asocia los anchos reales a los anchos que tiene la rampa diseñada (por defalut es 30 metros).

Finalmente se debe introducir manualmente la información correspondiente a la cantidad de switch backs y a entradas de fases en la pestaña “velocidades” para obtener el resultado de tiempo de viaje medio (presentada en la misma pestaña de control).

Cabe destacar que para realizar este análisis fué necesario tener una estimación de la probabilidad de encuentro de los camiones en sectores de angostamiento. A modo de tener una primera aproximación a esto se construyó un simulador pala-camión, en el cual se fue variando la fracción bidireccional y los ritmos de producción (flotas).

En este simulador se asumió que la ruta es de 6km con 60% de pendiente y que los tiempos de carguío y descarga eran distribuciones normales con medias de 4 y 3 min respectivamente, con desviación estándar de 1 min en los 2 casos.

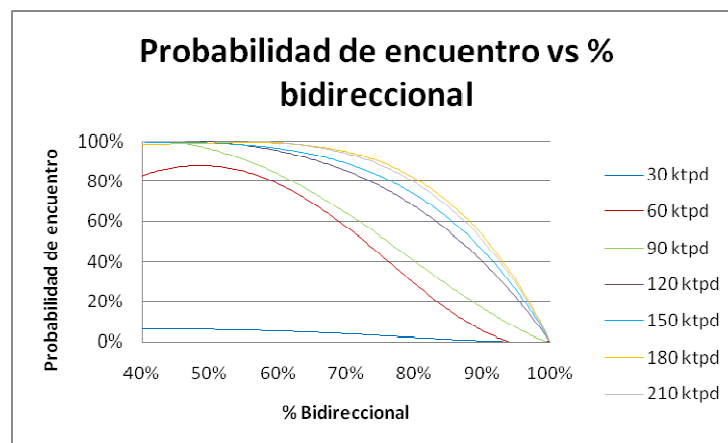


Ilustración 57: Resultado simulaciones de encuentro en angostamientos

Esto es el resultado solo de un conjunto de 3 repeticiones por simulación y no corresponde a una simulación tipo Montecarlo.

V.2 Estudio PSD 2010

Para el análisis de las flotas de camiones requeridas se procede a utilizar la planilla de cálculo de equipos basada en el Plan Sin Desarrollo 2010.

En este cálculo no se varió ningún parámetro, es decir, disponibilidades, utilización efectiva, tiempos de carga, descarga, factor de carga, etc.. Y solo se cambió el tiempo de transporte correspondiente al año 2011. La forma de cálculo de equipos es determinística, partiendo por una estimación del rendimiento de los camiones y, de acuerdo a los requerimientos de productividad, se obtiene la cantidad de camiones necesarios.

AÑO	Tiempo Promedio	Tiempo Ciclo Transporte min/ciclo				Tiempo Promedio	Tiempo Ciclo Carga min/ciclo				
	Transporte	210	255	330	400	Carguío•Desc•Acu•Imp	210	255	330	400	
2009											
2010											
2011											

Ilustración 58: Ingreso de tiempos de viaje en planilla de calculo de equipos

V.2.1 Casos de estudio

La comparación tendrá como base a la estimación actual de flota. Luego se tomará en cuenta el siguiente caso a futuro:

- Anchos de rampa desde la fecha hasta el 2011, se consiguen de acuerdo al diseño de planificación largo plazo (todos mayores igual a 30 metros)

Finalmente se procede a hacer un análisis de sensibilidad de acuerdo a estos casos:

- Diseños del 2011, todas las rampas con 30 metros de ancho (100% de bidireccionalidad en todas las rampas in-pit)
- 80% de bidireccionalidad en todas las rampas in-pit
- 60% de bidireccionalidad en todas las rampas in-pit
- 40% de bidireccionalidad en todas las rampas in-pit⁵

V.2.2 Resultados

Caso	BD total ruta	Tiempos de viaje (mins)	
		Komatsu	Liebherr
Actual		25.1	25.1
Modelo		24.1	21.2
100% bd		23.8	21.0
80% bd	90%	24.2	21.4
60% bd	81%	25.0	22.1
40% bd	71%	26.1	23.3

Tabla 22: Tiempos de viaje según caso

⁵ En la actualidad, y en base a las rampas estudiadas en el modelo, la bidireccionalidad dentro del pit es conseguida en un 40%. Luego, podría usarse como supuesto para la estimación futura (suponiendo que el logro de las líneas sigue siendo el actual).

De acuerdo a las rutas entregadas por PlanR, un 50% de las rutas 2011 estarán dentro del pit, por lo que se pondera la bidireccionalidad in-pit por la fracción de las rutas que efectivamente estarán dentro del pit. Como supuesto se tiene que afuera del pit, todos los anchos de rampa se consiguen y están por sobre los 30 metros, luego, en estos lugares la bidireccionalidad es de 100%.

La diferencia entre tiempos de viaje para cada flota radica en la velocidad que pueden alcanzar los camiones. Luego, ya que en el mediano plazo existirá una mezcla de flotas, se procede a analizar los 2 posibles casos:

1. Caso pesimista: La mezcla de flotas es tal que la velocidad de los camiones Liebherr siempre están influenciados por los camiones Komatsu.
2. Caso optimista: Existe una asignación diferenciada tal que en las rutas de los Liebherr nunca pasan camiones Komatsu por lo que no existen disminuciones de velocidad asociadas.

Caso	Requerimiento flota	
	Mezcla flotas	Asignación diferenciada
Actual	84	84
Modelo	81	78
100% bd	80	77
80% bd	81	78
60% bd	83	80
40% bd	86	83

Tabla 23: Flotas requeridas segun caso

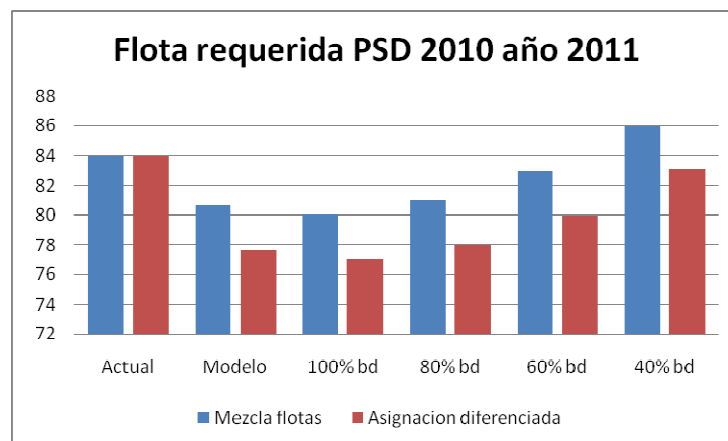


Ilustración 59: Flota requerida segun caso

Este cálculo de flota se realizó tomando en cuenta la base de los camiones que ya estaba estimada (84 caex) y sumando (o restando) el delta de camiones de 330 toneladas que se tiene de acuerdo a los cambios de rendimiento de estos según los tiempos de viaje.

Caso	Diferencia Flotas 330 requeridas	
	Mezcla flotas	Asignación diferenciada
Actual	0.63	0.63
Modelo	3.33	6.37
100% bd	3.91	6.98
80% bd	3.03	6.06
60% bd	1.04	4.00
40% bd	-1.94	0.92

Tabla 24: Diferencia de flotas requeridas según caso

En base a una situación actual, de un cumplimiento de los anchos en las rampas de un 40%, se tiene una flota requerida de 78 caex, que es inferior a los 80 planificados. Por otro lado, el cumplimiento total de los anchos implica un ahorro de 3 camiones.

V.2.3 Análisis de resultados

Se observa una tendencia a tener sobrestimación de camiones con el método actual si es que las condiciones dadas en los supuestos se cumplen, es decir, si las rampas logran efectivamente un cierto porcentaje de bidireccionalidad.

En el 1º caso se tiene una sobrestimación de entre 3 a 6 camiones. Esto quiere decir que si se consiguen las líneas del 2011, entonces puede haber una holgura de camiones.

De acuerdo a lo entregado por el modelo se tiene que las diferencias de camiones no exceden los 6 caex en una flota universo de 84. Esto significa que las diferencias de productividades no debiesen ser mayor a un 8%.

Otro punto importante es el caso “40% bd” que es, en la teoría, lo más cercano a la realidad ya que, según lo mencionado anteriormente, es la bidireccionalidad conseguida en la mina actualmente. Luego, si se supone que en el futuro los diseños tendrán el mismo comportamiento, se puede deducir que la estimación actual es bastante acertada y se tiene un déficit de aproximadamente 2 camiones 330, en el caso de las mezclas de flotas (pesimista) y cero déficit si es que las flotas logran asignarse preferencialmente (caso optimista).

Si bien existe ahorro importante en camiones al considerar mezclas o asignaciones preferenciales, la realidad se ubica entre ambas situaciones. No es recomendable guiarse por los valores optimistas sino mas bien tomar en cuenta que en el mediano plazo siempre existirá mezcla de flotas en la mina y por ende el tiempo de viaje medio tenderá a ser el de la flota Komatsu.

Por ultimo se tiene que la estimación actual es bastante similar a la estimación realizada por el modelo con el supuesto de la bidireccionalidad a 40% de la mina. Con esta información se puede concluir que bajo los parámetros actuales existe una aproximación bastante buena en lo que se refiere a la velocidad de los camiones y a la fenomenología asociada (angostamientos, switch backs, etc.).

Con esto no se busca avalar ni descartar a los parámetros actuales, y solo se puede concluir que bajo una estimación de velocidades realizada hace mucho tiempo, basada en otras flotas y condiciones, se obtuvo una buena aproximación para el presente y futuro corto-plazo pero limita el largo plazo en función de otros diseños.

CAPITULO VI: CONCLUSIONES

VI.1 Discusión y Conclusiones

El resultado de este estudio se ve reflejado en un modelo de velocidades de camiones que depende de 5 variables relacionadas con el diseño de la mina, específicamente de las rampas. Este modelo tiene como error estándar de estimación global 3 km/h comparados con los 7 km/h de error de estimación entregados por la metodología actual, lo que presenta una mejora notoria en la estimación de velocidades.

En general se concluye acerca de la mejor estimación del modelo en comparación con la actualidad, no completamente por el nivel de confiabilidad que presenta el error estándar de estimación sino porque, salvo algunas excepciones, en general en todas las rutas y periodos mejora la estimación.

Esta mejora tiene como aristas principales, primero el que sea una actualización de los parámetros de velocidad utilizados. Cabe consignar que los valores actualmente usados se estimaron en base a la flota de camiones Komatsu 930E y se proyecta utilizar camiones Liebherr T282B en el futuro, debido al mayor tonelaje (400 tc vs 330 tc) que estos tienen.

En segundo lugar, el hecho de que incluye el factor que más afecta a la velocidad dentro de la mina como lo es el angostamiento de la rampa. Y por último, que considera otras variables de diseño como lo es el Switch Back y las Entradas de Fase, que tienen una gran influencia en la velocidad media de las flotas si es que se encuentran en gran cantidad en la composición de la rampa (Pueden existir diseños de hasta 7 Switch Backs que, según las estimaciones actuales, puede influir en alrededor de 1.4 km en la rampa, lo que es un 25% de una rampa promedio de 6 km).

También se desarrolló una metodología clara y repetible, con la cual se procedió a generar la base de datos de velocidades que servirán de input para construir el modelo. Esta metodología de filtros de tiempos quedó bien documentada tanto en su concepto como en el lenguaje de programación por lo que se hace fácil su replicación en el futuro, para otros estudios de estas características, que así lo requieran.

Se procedió a construir el modelo en base a un análisis de datos. Cabe consignar que es un modelo empírico y por ende su fuente de información es la realidad misma que incluye muchas variables que acá no se consideraron por lo que se supone que existe un error difícil de omitir y por ende solo se buscó minimizarlo.

Todas las variables de diseño anteriormente consideradas son importantes pero es necesario dar énfasis en el tema de los angostamientos por el hecho de que el ancho de rampa es, de las mencionadas anteriormente, quizás la más influyente en la factibilidad económica de una posible fase. Esto debido a que el ancho de rampa, y cantidad de estas, es primordial en el talud de diseño de la mina.

En la actualidad el ancho de rampa de diseño, utilizado en planificación largo plazo, es de 30 m. De acuerdo a las estimaciones dadas en el trabajo, se tiene que los 30 metros son críticos en el sentido de que cualquier ancho menor a este puede desencadenar problemas de tráfico o cambios de velocidad en los equipos de transporte (basados en las flotas estudiadas).

A esto se suma el hecho que, por motivos que en este informe no se profundizan, las líneas de diseño no se consiguen y dan espacio a la existencia de anchos menores al comprometido. En la actualidad, la faena Radomiro Tomic tiene como promedio 28.6 m de ancho de rampa conseguido y, considerando el ancho crítico, se tiene que de las rampas interior mina, un 40% corresponde a anchos en donde no hay angostamientos (40% de bidireccionalidad en las rampas interior mina). Luego, existen 2 caminos que se pueden dar y que es facultad de la empresa la elección de uno u otro:

1. Continuar con el diseño a 30 metros, pudiéndose realizar un estudio más acabado para estimar el delta de productividad asociado a que en operaciones no se consiga la línea de diseño.
2. Asumir en la planificación largo plazo esta diferencia. Es decir, suponer que históricamente operaciones cumple en un cierto porcentaje las líneas de diseño, por lo que se estima un ancho en el cual se asegure conseguir 30 metros como mínimo.

Si se opta por el primero entonces las diferencias en velocidades medias obtenidas en la mina, asociadas a la no obtención de la línea de diseño, se considerarán como input en la estimación de la disminución de productividad de los caex.

Si se opta por el segundo, entonces la planificación completa cambia, en el sentido de que el cambio en los anchos de rampa cambia el talud de diseño que al final influye en la generación de los conos (pits) de las posibles fases. Cabe consignar que este paso es bastante aproximado y en la realidad, el mayor cambio que puede existir es en una etapa posterior de los proyectos, en los cuales ya se comienza a diseñar (con los pits definidos) y por ende los anchos afectan la cantidad de material a mover, principalmente estéril.

Este estudio es importante desde el punto de vista de las posibilidades de mejora del diseño y específicamente de las mejoras en los logros de este. Este último punto es el más importante en el modelo anteriormente presentado, tema que se explica con el siguiente análisis.

Si se toma una rampa “tipo” de 6 km con 60% de tramo en pendiente se tiene lo siguiente

Observaciones	Diferencias	
	Cargado	Vacio
Rampa media de 6 kilometros con 60% de pendiente		
40% de bidireccional con probabilidad de encuentro de 70%	-5%	-32%
3 Switch backs	0%	-10%
2 Entradas	0%	-7%
2 Cambios de pendiente	-1%	0%

Tabla 25: Diferencias de velocidades según variables

Cálculo que se basó en la diferencia de las velocidades entregadas por el modelo para el caso de la rampa base anteriormente explicada, y la adición de factores de diseño considerados.

Luego, entre los factores de mayor impacto, el que resalta es el angostamiento de la rampa (bidireccionalidad). Esto da pie para que se concluya que el principal foco a analizar en un futuro es como conseguir que las líneas de diseño se logren de acuerdo a lo planificado, ya que es un factor crítico desde el punto de vista de la productividad de los camiones dentro del pit.

También influye en la velocidad una cantidad considerable de switch-backs y entradas a fases, pero cabe recordar que un 10% en la velocidad vacio representa no mas de 4 km/h y que, además, la importancia de la velocidad vacio dentro del tiempo de ciclo total es de alrededor de un 20% por lo que este cambio supera un 3% en la productividad total del camión.

Observaciones	Diferencia de productividad
Rampa media de 6 kilometros con 60% de pendiente	
40% con probabilidad de encuentro de 70%	-12%
3 Switch backs	-3%
2 Entradas	-2%
2 Cambios	-1%

Tabla 26: Diferencia de productividad de un caex según variables

El resultado de este trabajo es un modelo simple, lineal y sencillo de utilizar, el cual mejora las estimaciones de velocidades de los camiones de extracción principalmente por la adición de nuevos factores, relacionados con el diseño, que tienen influencia sobre la velocidad.

VI.2 Recomendaciones

Es recomendable realizar un análisis más profundo en relación a los motivos de porque las líneas de diseño no se consiguen debido a que el angostamiento es el factor que mas afecta en la estimación. En base a esto se puede hacer una planificación considerando estos factores o en su defecto se puede optar por realizar una gestión junto con operaciones con el objetivo de ir mejorando el logro de las líneas de diseño.

En la tabla 27 se muestra la diferencia de productividades en el ejemplo de la rampa “tipo” de 6 km. En base a esto se observa un efecto importante de los angostamientos por lo que se sustenta el hecho de que es el factor de mayor relevancia a considerar en un futuro estudio.

Se propone utilizar el modelo en un análisis posterior, en donde se pueda cuantificar las interferencias por tráfico, angostamientos, fallas mecánicas de camiones en rampa, etc.. asociadas a ciertos diseños. Para esto es necesario realizar una simulación para verificar el real beneficio de diseñar rampas a distintos anchos. Junto con esto se puede obtener una probabilidad de conseguir ciertos niveles de producción variando el ancho de rampa.

La importancia de este análisis radica en los montos utilizados en inversión de camiones. Si se observa la tabla 24 se tiene que existe, según el caso, ahorros de 3 camiones o falta de 2. Luego, si se considera una inversión de 5 MMUSD\$ por camión, con un costo operacional de 2.5 MMUSD\$ y vida útil de 8 años, se tiene un valor actualizado (tasa 8%) por camión de 22 MMUSD\$, por lo que la variación de inversión en camiones va desde ahorrar 60 MMUSD\$ hasta tener que invertir 40 MMUSD\$, aproximadamente.

Uno de los factores que no fue incluido en el modelo es el de los pasacables aéreos. Cabe destacar que es un tema importante debido a que genera puntos de estrechez en las rampas según las fases operativas que se encuentran en bancos inferiores. Debido al criterio que se utiliza para elegir entre aéreos cerro-poste o poste-poste, y según la situación actual de la mina que cada vez se va profundizando mas, se recomienda tener anchos de rampa de 35 metros en aquellas que se encuentran por sobre fases operativas (en producción o en desarrollo), con el objetivo de tener 5 o 6 metros de ancho en los cuales puedan instalarse los aéreos sin generar angostamientos (recordar que las bases son de 1.5 metros de radio y que de acuerdo a la situación de la mina, se están usando aéreos tipo poste-poste).

Las velocidades de las flotas son distintas debido a sus características de potencia, peso y carga soportable. En el estudio se mostró una diferencia sustancial en las velocidades de los camiones

cargados en subida (4 km/h aproximadamente), lo que influye en los tiempos de ciclo. El problema de la diferencia de flotas se puede enfrentar de 2 maneras:

1. Recomendaciones de planificación largo plazo al área de operaciones para utilizar flotas preferenciales en algunas fases (habiendo hecho el cálculo de velocidad media de acuerdo a la flota requerida).
2. Estimar las velocidades medias de la flota de menor potencia (Komatsu 930E) asumiendo que existirá una mezcla de camiones en el mediano plazo. Esto, hasta que la renovación de camiones sea importante y la flota de Liebherr pase a ser la principal.

Nota: Los valores finales de velocidades reales y reglamento han sido modificados debido a políticas de privacidad de la empresa. Esto no conlleva un cambio en los errores presentados.

BIBLIOGRAFÍA

Armstrong, David. 1989. "Definition of Mining Parameters". Surface Mining 2nd Edition, pp 459-464.

Ramani, R,V. 1989. "Haulage Systems Simulation Analysis". Surface Mining 2nd Edition, pp 724-742

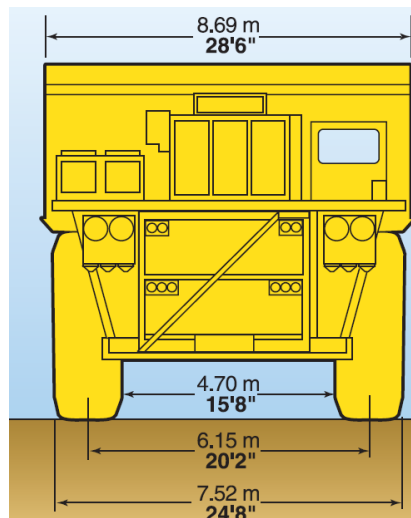
1. ATKINSON T., "Design and layout of Haul Roads". En Mining Engineering Book Capitulo 13.4, sección "Number of Lanes" y "Road Width"
2. ARMSTRONG D, "Definition of mining parameters". En Surface Mining, Second Edition by Kennedy. Capitulo 5.1.
3. ELBROND J., "Haulage system analysis". En Surface Mining, Second Edition by Kennedy. Capitulo 6.5.8.
4. White JW, Olson JP, Vohnout SI, "On improving Truck/Shovel Productivity in Open Pit mines". En CIM Bulletin de Canadian Institute of Mining, 1993.
5. Hall B, "How mining companies improve Share Price by Destroying Shareholder Value". En CIM Mining Conference and Exhibition, Montreal 2003.
6. Wharton C, "What They don't teach you in Mining School, Tips and Tricks with Pit Optimizers". En Surface mining 1996.
7. CODELCO NORTE, "Reglamento de Carguio y Transporte de las minas de Codelco Norte R-033". En Reglamento Interno Específico de Operaciones Criticas de Minería

ANEXOS

- Variables que tienen efecto sobre la velocidad de los camiones

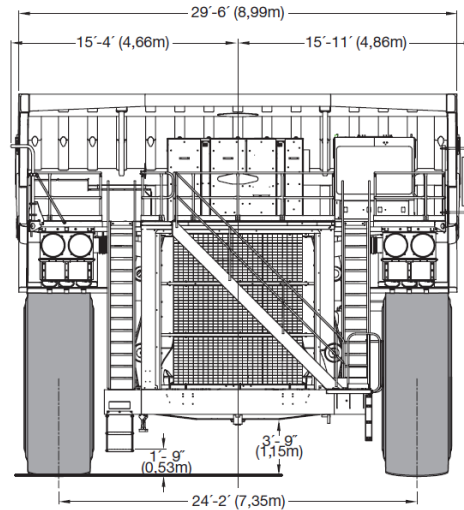
Variable	Efecto
Pendiente	Velocidad
Ancho rampa	Velocidad y detención
Switch-back	Velocidad
Cambios de pendiente	Aceleraciones
Derrames de mina	Velocidad y detención
Derrames de camiones	Velocidad y detención
Entrada de fase	Velocidad
Condición de carpeta	Velocidad
Condiciones de tráfico	Velocidad y detenciones
Paso de equipos menores	Velocidad
Carga del camión	Velocidad
Visibilidad de la mina	Velocidad
Mecánica del camión	Velocidad
Existencia de aéreos	Velocidad y detenciones
Cruces entre rampas	Detenciones
Curvatura de la rampa	Velocidad

- Especificaciones técnicas de los camiones
- Komatsu



Ancho máximo de los camiones Komatsu 930E es de 8.7 m aproximadamente.

- Liebherr



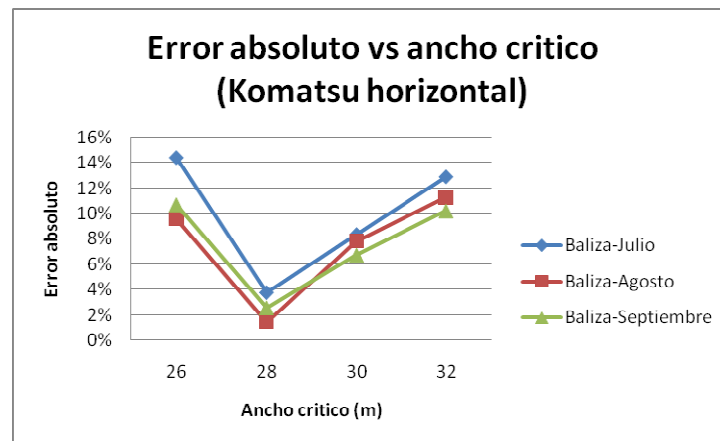
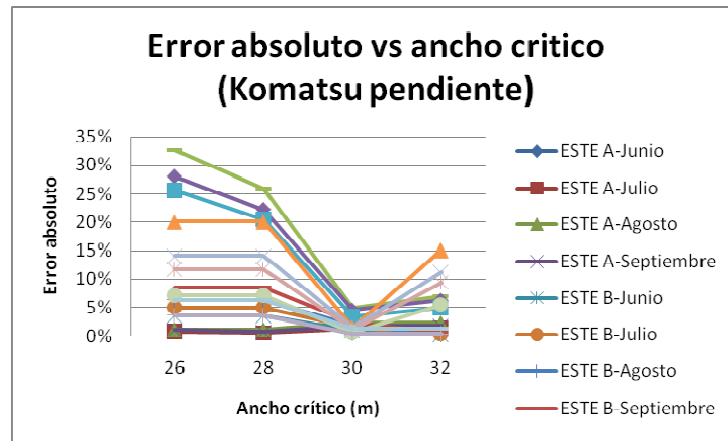
Para los camiones Liebherr T282B, el ancho máximo está dado en el sector frontal, y corresponde a la distancia entre los espejos retrovisores. Este ancho se estima en 9.5 m.

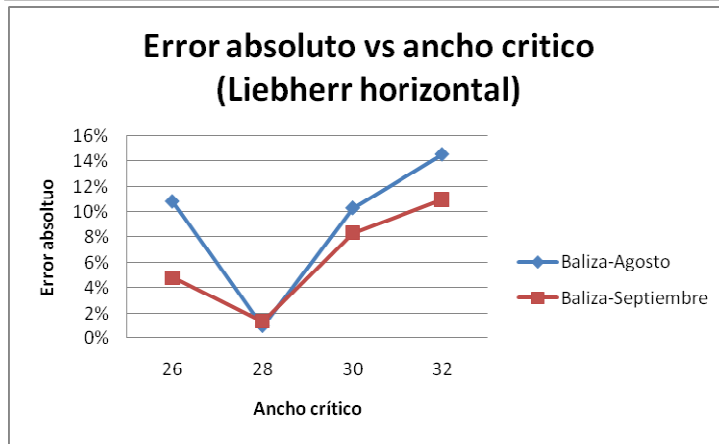
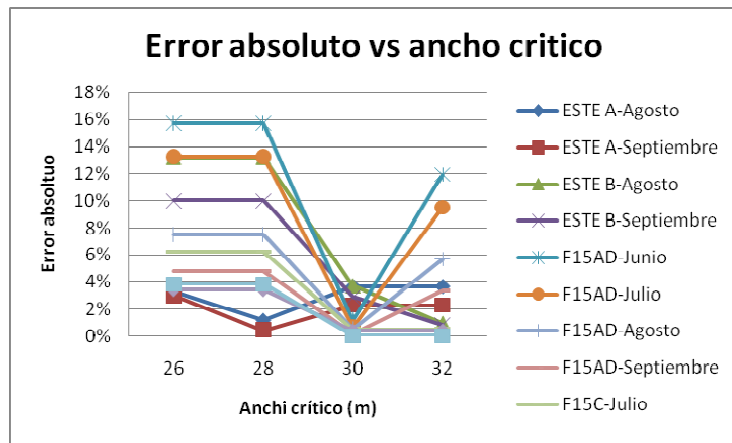
- Datos con los que se calculo el ancho bidireccional

Situación	Flota	Rampa	Fecha	VBD	Nº datos	V peor caso	Nº datos	Datos total	Prob
Horizontal	Komatsu	Baliza	Julio	48.5	24	27.3	40	64	63%
		Baliza	Agosto	47.1	18	27.9	20	38	53%
		Baliza	Septiembre	47.2	43	27.2	47	90	52%
	Liebherr	Baliza	Agosto	46.9	8	28.3	13	21	62%
		Baliza	Septiembre	48.4	22	30.7	16	38	42%
		ESTE A	Junio	35.6	100	24.0	16	116	14%
Pendiente	Komatsu	ESTE A	Julio	36.4	223	23.8	33	256	13%
		ESTE A	Agosto	35.5	184	23.8	45	229	20%
		ESTE A	Septiembre	36.0	209	23.6	42	251	17%
		ESTE B	Junio	41.4	145	21.3	11	156	7%
		ESTE B	Julio	41.2	281	21.5	31	312	10%
		ESTE B	Agosto	41.4	202	21.7	29	231	13%
		ESTE B	Septiembre	41.2	210	21.9	42	252	17%
		ESTE D	Julio	50.4	18	32.5	71	89	80%
		ESTE D	Agosto	49.8	17	32.4	45	62	73%
		ESTE D	Septiembre	50.0	15	32.1	29	44	66%
		F15 AD	Junio	42.7	48	29.1	66	114	58%
		F15 AD	Julio	41.6	102	28.9	84	186	45%
		F15 AD	Agosto	41.9	117	29.1	73	190	38%
		F15 AD	Septiembre	42.5	48	29.1	15	63	24%

	F15 C	Agosto	30.2	98	19.9	23	121	19%
	F15 C	Septiembre	30.4	17	19.4	7	24	29%
	ESTE A	Agosto	36.1	38	23.1	22	60	37%
	ESTE A	Septiembre	36.5	71	22.7	28	99	28%
	ESTE B	Agosto	42.9	48	21.9	15	63	24%
	ESTE B	Septiembre	44.1	55	21.7	12	67	18%
	F15AD	Junio	42.1	54	28.9	50	104	48%
Liebherr	F15AD	Julio	42.3	108	28.7	73	181	40%
	F15AD	Agosto	42.3	100	28.9	33	133	25%
	F15AD	Septiembre	42.7	81	28.7	15	96	16%
	F15C	Julio	30.4	75	20.2	37	112	33%
	F15C	Agosto	30.1	82	20.0	19	101	19%
	F15C	Septiembre	30.3	59	20.7	18	77	23%

- Gráficos con los errores absolutos según ancho crítico

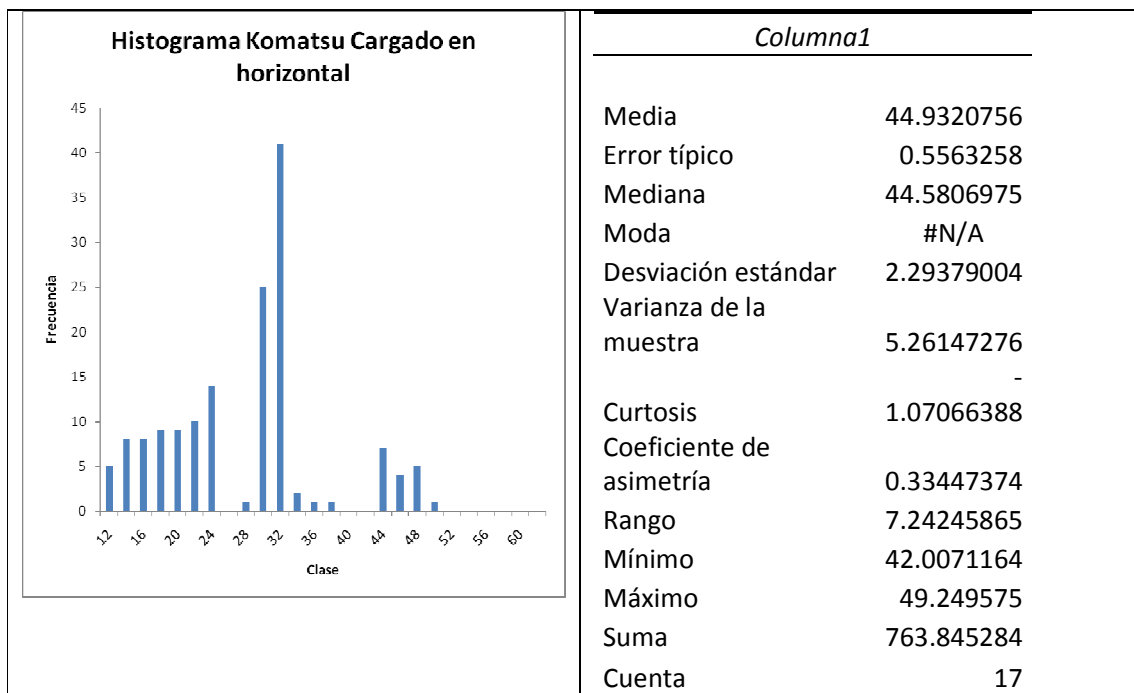
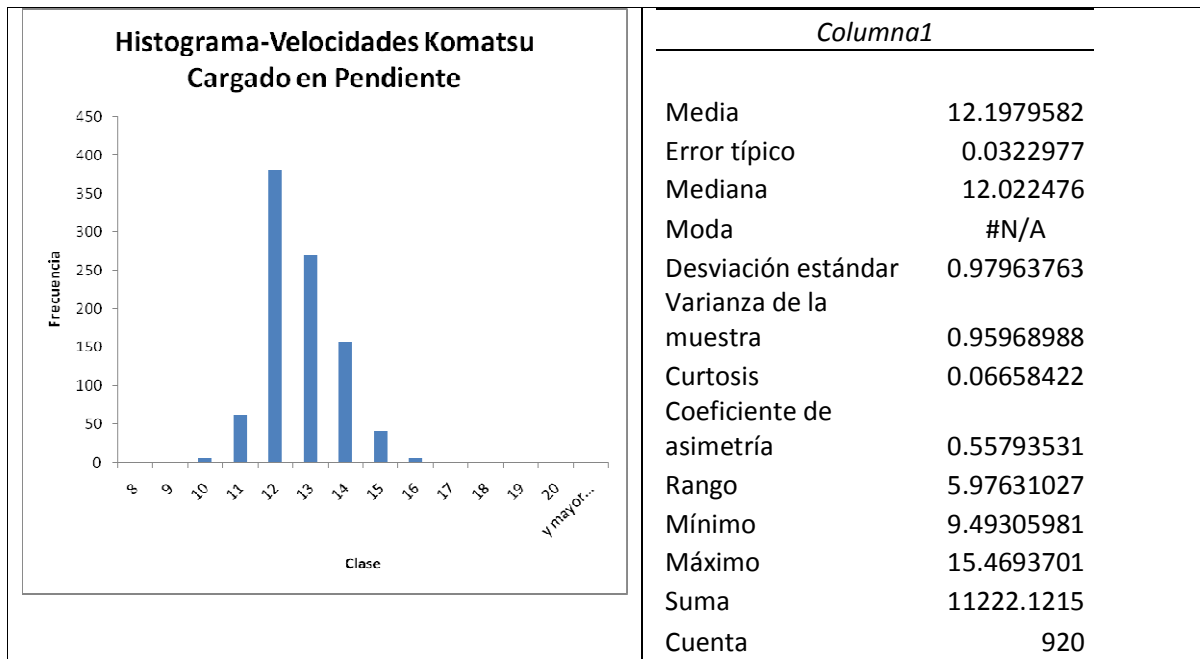


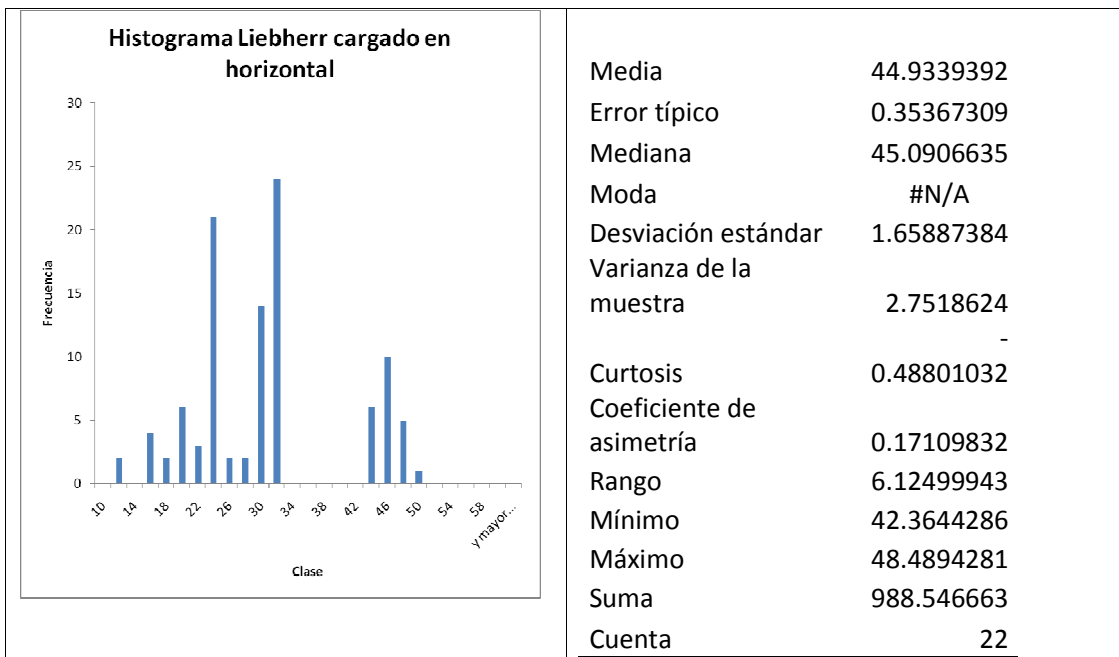
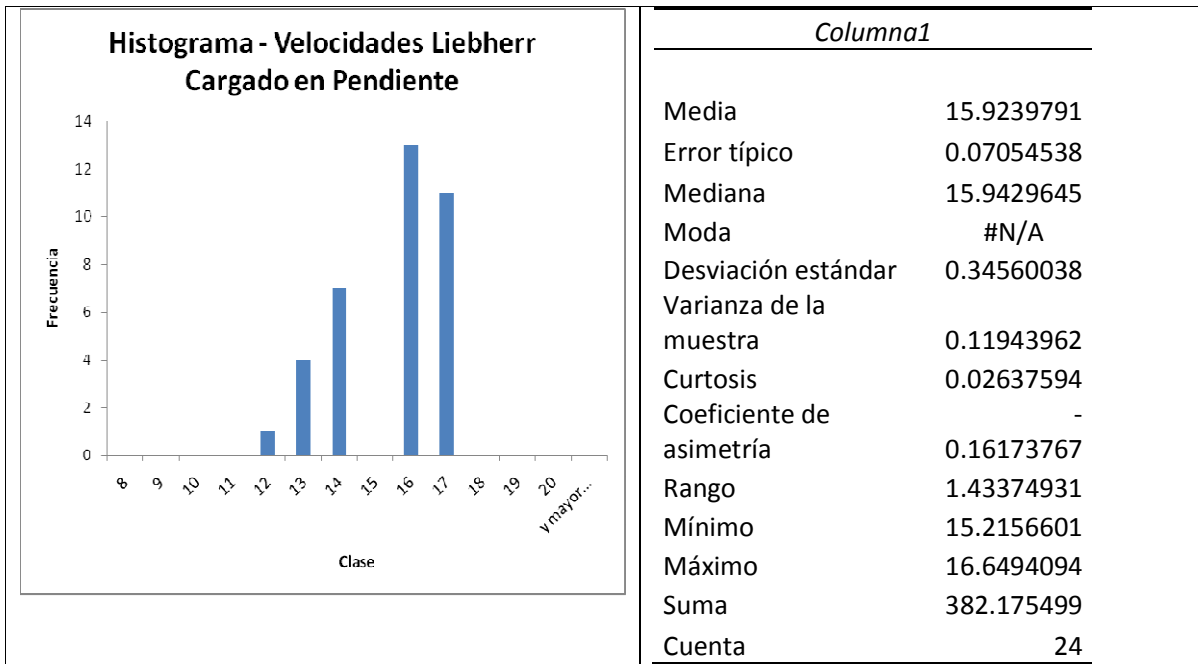


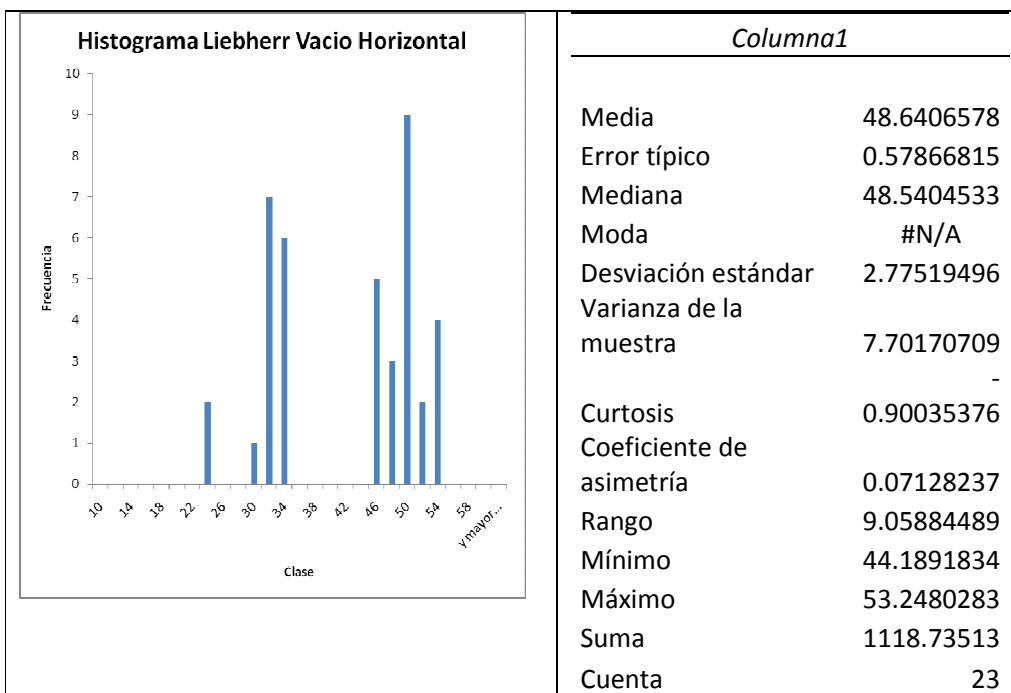
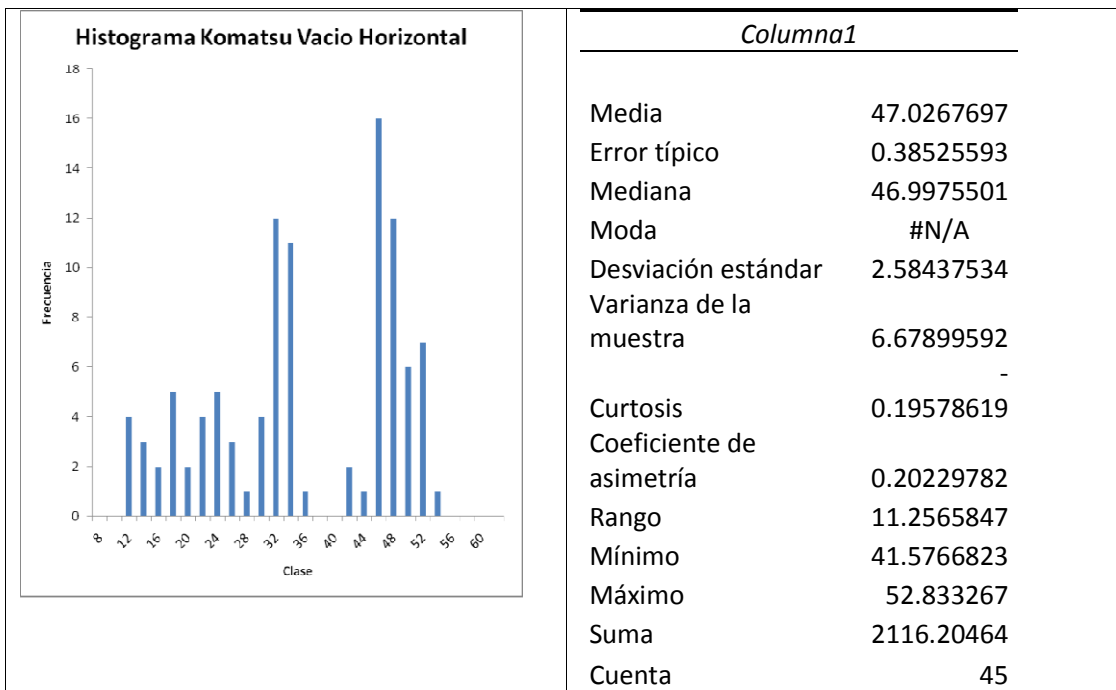
- Características de las rampas con las que se estimaron los parámetros del modelo

ARCHIVO	LARGO	Anchos		% sobre 30mts	% HORIZ	% SOBRE 5%
		ANCHO MEDIO				
tramoA_entradaEste_010909	584	28		0%	0%	100%
tramoB_entradaEste_010909	320	29		34%	0%	100%
tramoA_entradaF15_010909	481	29		46%	0%	100%
tramoB_entradaF15_010909	409	30		55%	90%	10%
tramoC_entradaF15_010909	475	28		6%	0%	94%
tramoD_entradaF15_010909	219	29		77%	0%	100%
tramoAB_entradaEste_010909	903	28		12%	0%	100%
largo_baliza_010909	747	26		9%	100%	0%
tramoAD_entradaF15_010909	700	29		56%	0%	100%
tramoBC_entradaF15_010909	883	29		26%	42%	58%
entradaF15_010809	1722	29		40%	23%	62%
tramoC_entradaEste_010909	575	27		22%	24%	76%
tramoD_entradaEste_010909	804	29		34%	0%	94%

- Datos de velocidades usados como parámetros del modelo



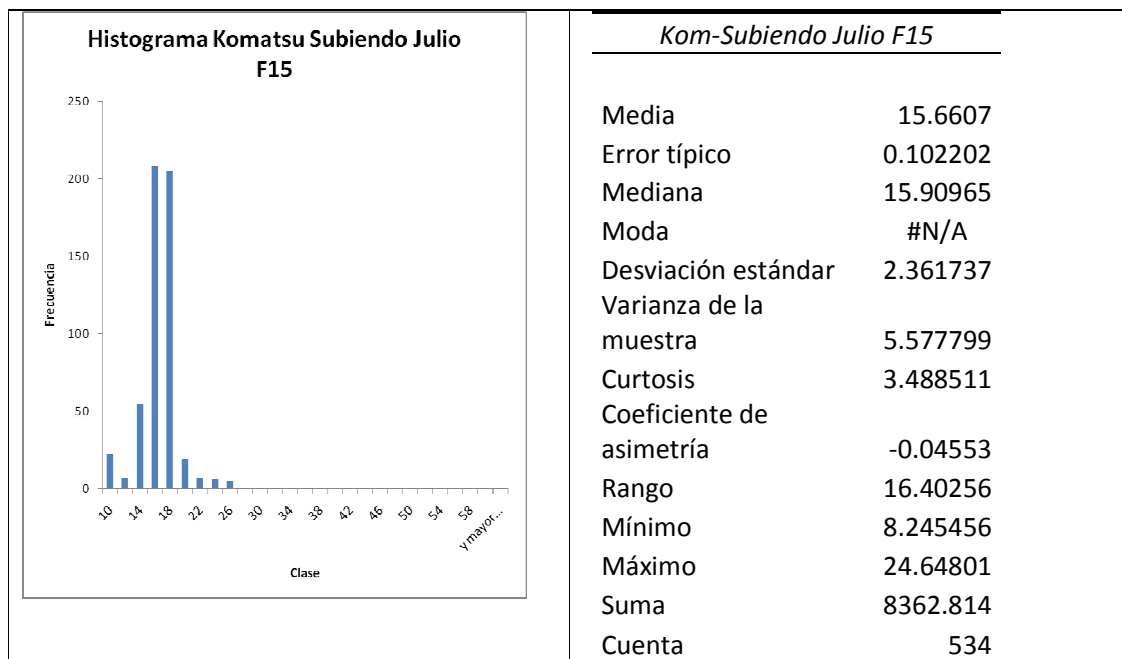


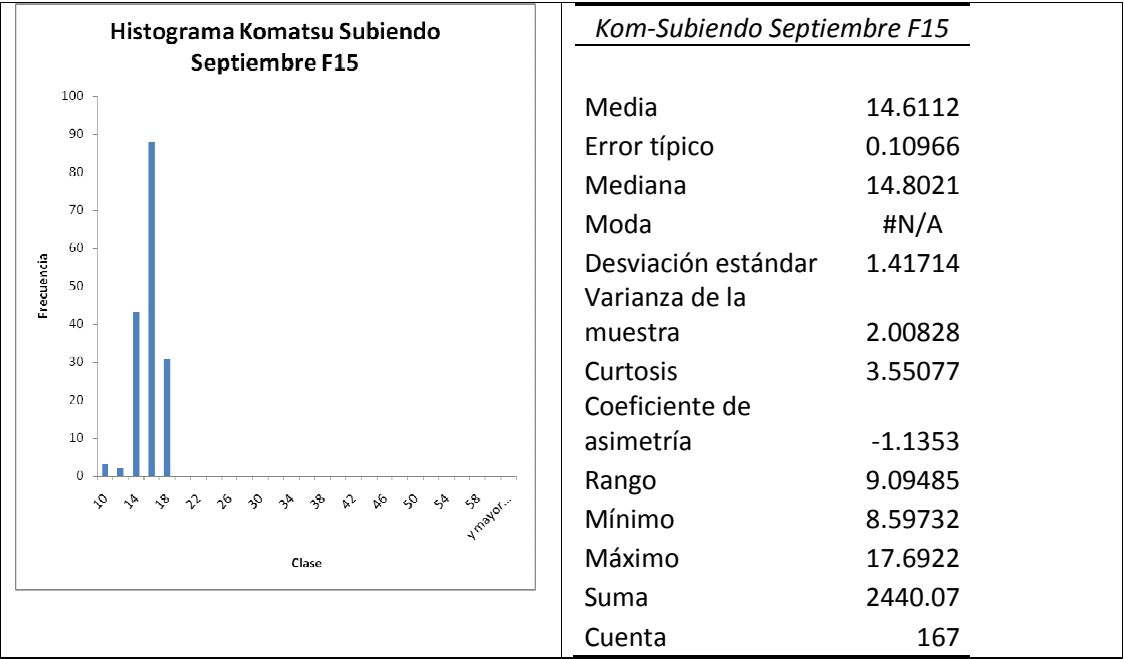
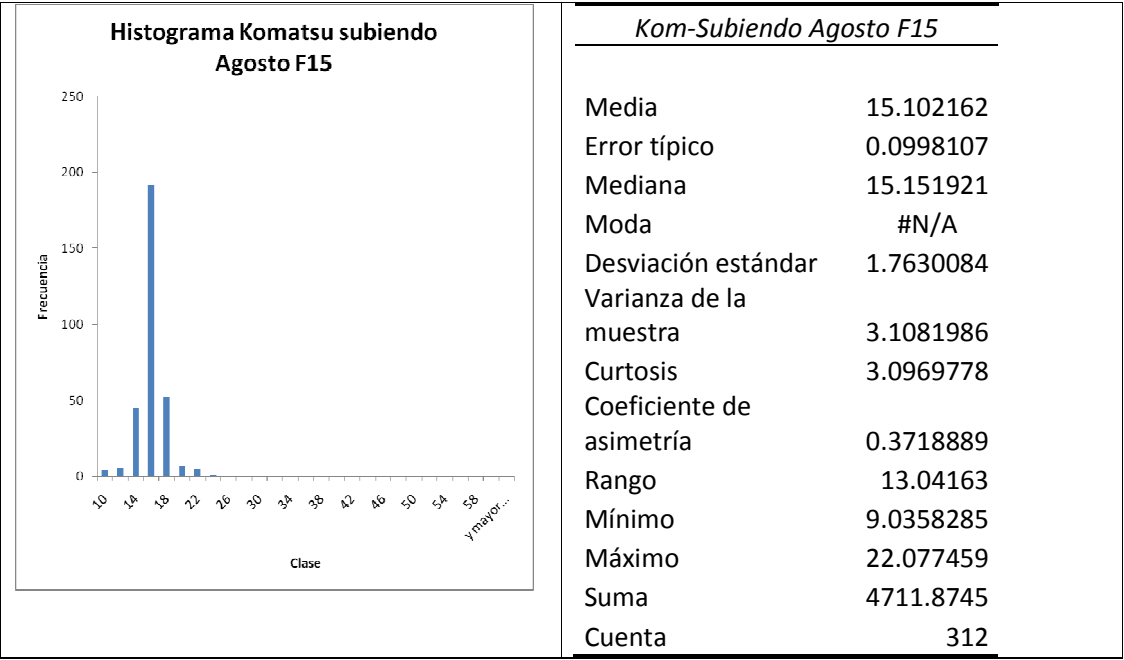


- Características de rampas con las que se hizo la calibración del modelo

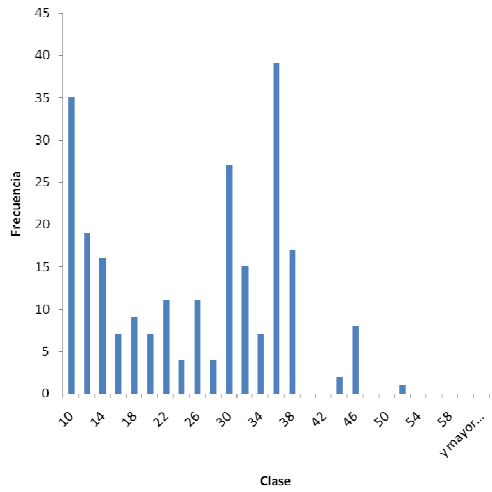
ARCHIVO	LARGO	Anchos		% sobre 30mts	% HORIZ	% SOBRE 5%
		ANCHO MEDIO				
entradaF15A_010709	1030	30		85%	25%	71%
entradaF15total_010709	1473	29		72%	22%	69%
entradaF15total_010809	1554	29		49%	17%	66%
entradaF15total_010909	1740	29		58%	17%	77%
entradaEsteBaliza010809	1750	28		20%	38%	55%
F15 corr jul	1464	29		42%	26%	68%
F15 corr ago	1550	29		40%	24%	76%
F15 corr sep	1706	29		45%	22%	78%
Este-cruce baliza	968	29		17%	0%	100%
cruce baliza - fondo mina	1210	28		26%	8%	88%
fondo mina - F14	2036	29		72%	63%	30%
largo_baliza_010909	747	26		9%	100%	0%

- Datos de velocidad usados como comparación del modelo





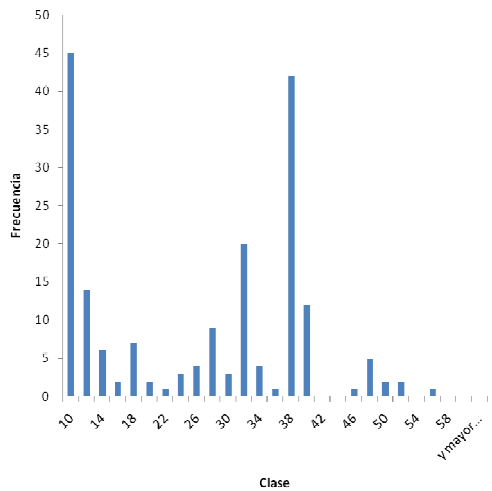
Histograma Komatsu Bajando Julio F15



Kom-Bajando Julio F15

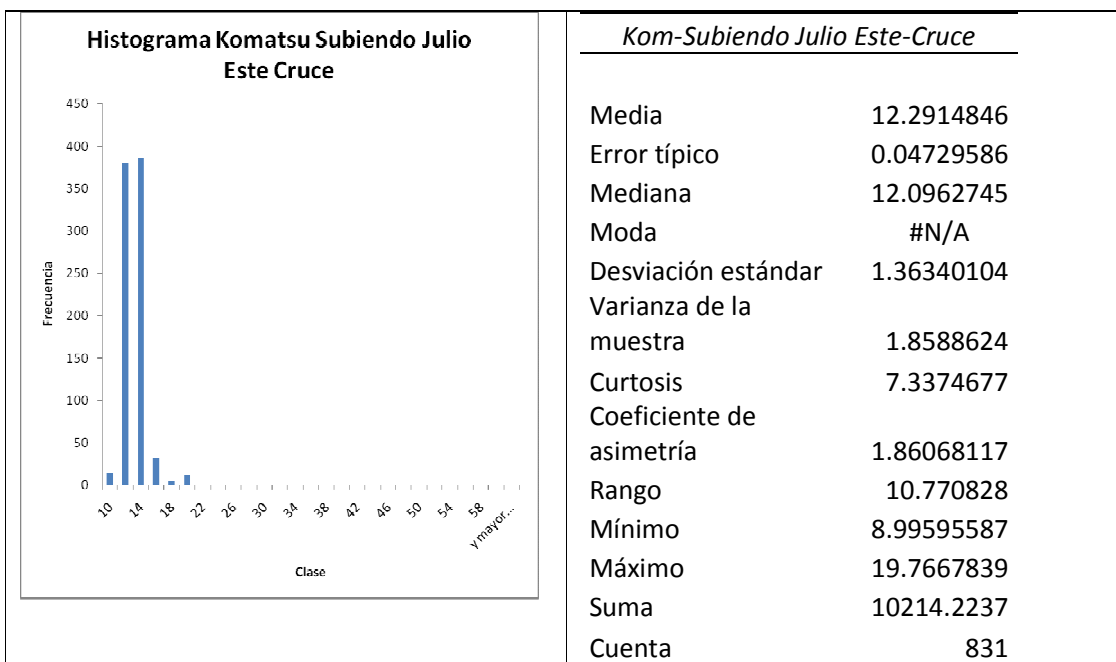
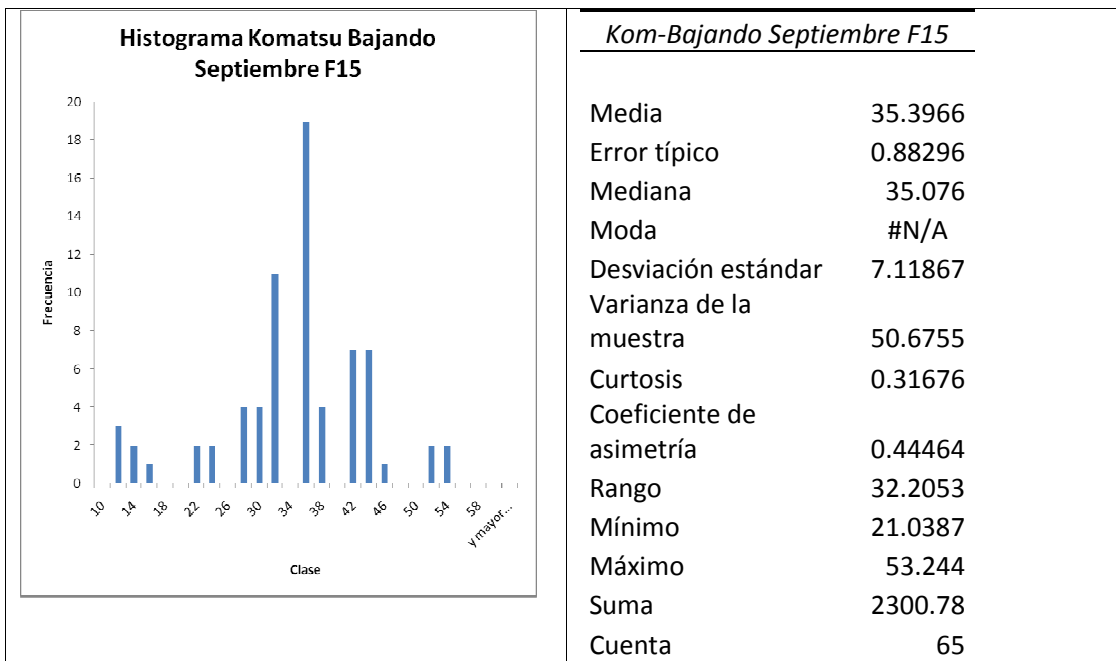
Media	31.98053
Error típico	0.501685
Mediana	32.49884
Moda	#N/A
Desviación estándar	6.082607
Varianza de la muestra	36.99811
Curtosis	0.338726
Coefficiente de asimetría	0.17471
Rango	31.719
Mínimo	19.96868
Máximo	51.68768
Suma	4701.137
Cuenta	147

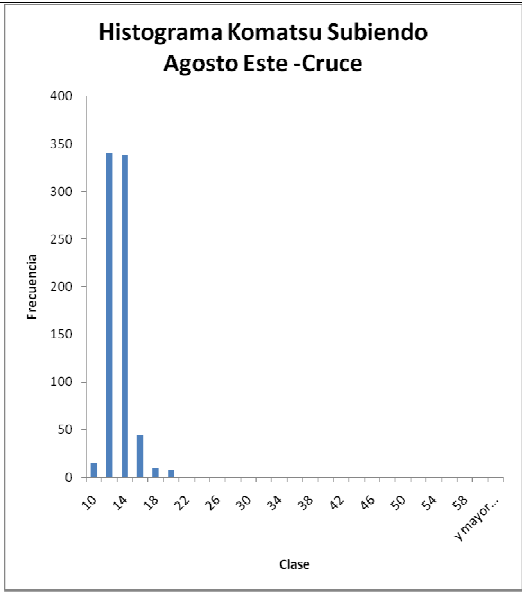
Histograma Komatsu Bajando Agosto F15



Kom-Bajando Agosto F15

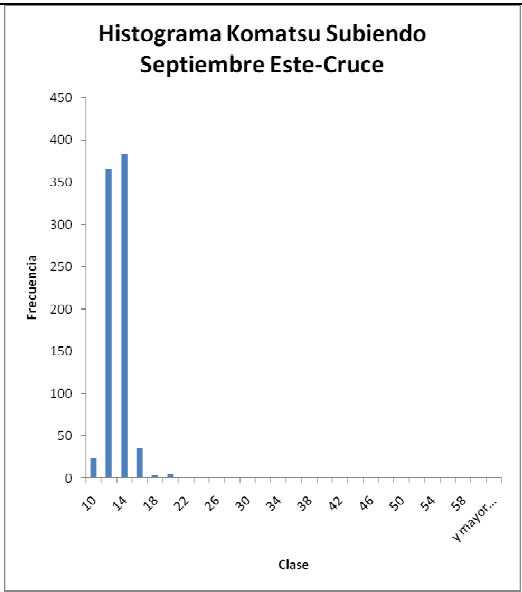
Media	35.167266
Error típico	0.616082
Mediana	36.619715
Moda	#N/A
Desviación estándar	6.4615229
Varianza de la muestra	41.751278
Curtosis	0.5980817
Coefficiente de asimetría	0.396742
Rango	33.995181
Mínimo	20.781689
Máximo	54.77687
Suma	3868.3993
Cuenta	110





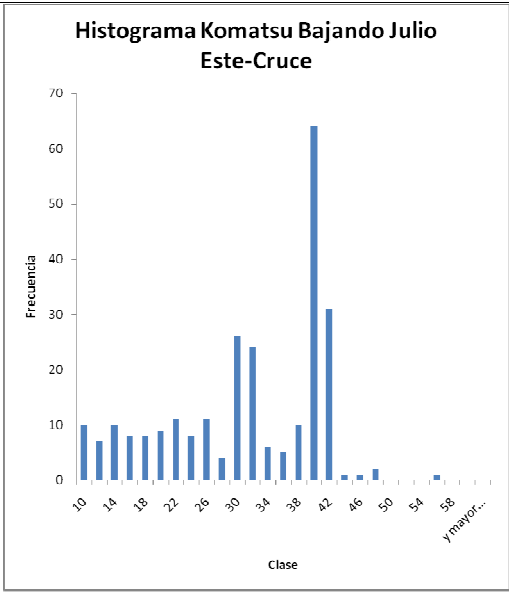
Kom-Subiendo Agosto Este-Cruce

Media	12.2956071
Error típico	0.05088408
Mediana	12.0439411
Moda	#N/A
Desviación estándar	1.39815534
Varianza de la muestra	1.95483835
Curtosis	6.36579748
Coefficiente de asimetría	1.70110275
Rango	11.1124019
Mínimo	8.66791388
Máximo	19.7803157
Suma	9283.18339
Cuenta	755



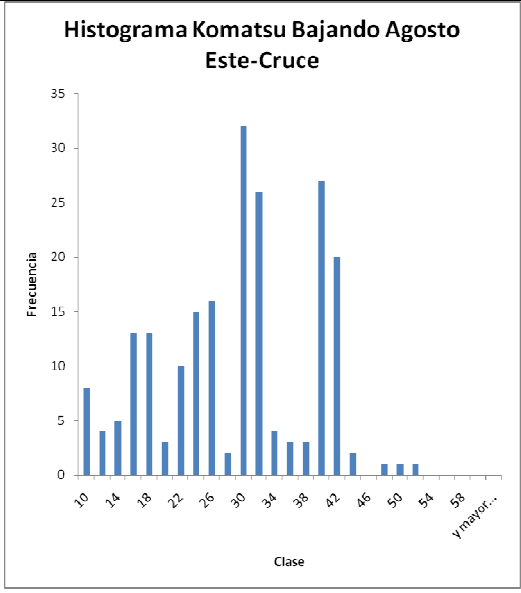
Kom-Subiendo Septiembre Este-Cruce

Media	12.1930834
Error típico	0.04373306
Mediana	12.0802987
Moda	#N/A
Desviación estándar	1.25079606
Varianza de la muestra	1.56449077
Curtosis	5.82308936
Coefficiente de asimetría	1.22063465
Rango	10.8837818
Mínimo	8.82432311
Máximo	19.7081049
Suma	9973.94219
Cuenta	818



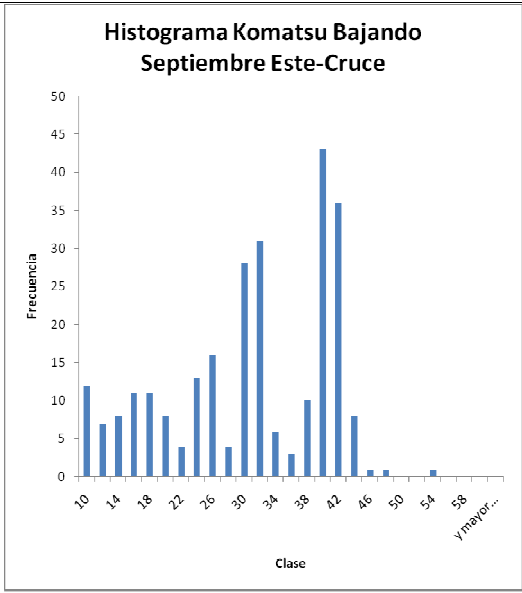
Kom-Bajando Julio Este-Cruce

Media	34.3180537
Error típico	0.46601394
Mediana	37.6855605
Moda	#N/A
Desviación estándar	6.67230426
Varianza de la muestra	44.5196442
Curtosis	-
Coficiente de asimetría	0.51513637
Rango	0.41609033
Mínimo	34.9976843
Máximo	20.0718537
Suma	55.069538
Cuenta	7035.201
	205



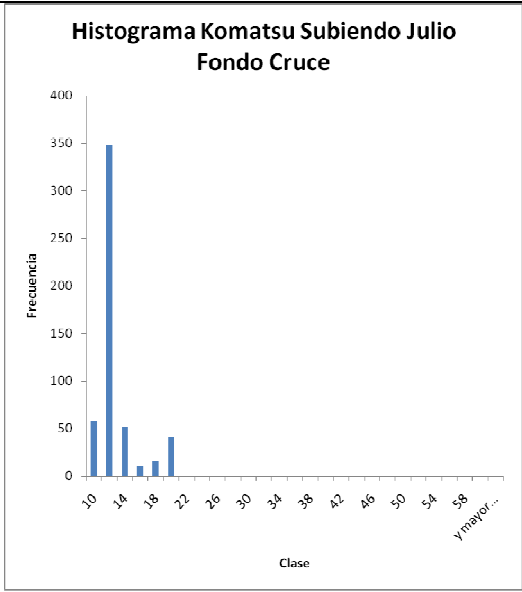
Kom-Bajando Agosto Este-Cruce

Media	31.8708714
Error típico	0.54634461
Mediana	30.2227313
Moda	#N/A
Desviación estándar	6.97526101
Varianza de la muestra	48.6542661
Curtosis	-
Coficiente de asimetría	0.83601276
Rango	0.24034229
Mínimo	30.5583806
Máximo	20.0573941
Suma	50.6157747
Cuenta	5194.95205
	163



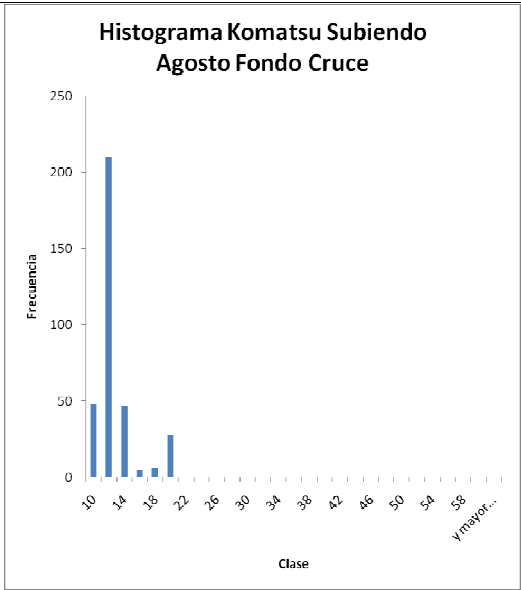
Kom-Bajando Septiembre Este-Cruce

Media	34.0518205
Error típico	0.45977724
Mediana	34.2494319
Moda	#N/A
Desviación estándar	6.58300822
Varianza de la muestra	43.3359972
Curtosis	-1.0551284
Coefficiente de asimetría	-
Rango	0.17018945
Mínimo	32.468859
Máximo	20.0535523
Suma	52.5224113
Cuenta	6980.6232
	205



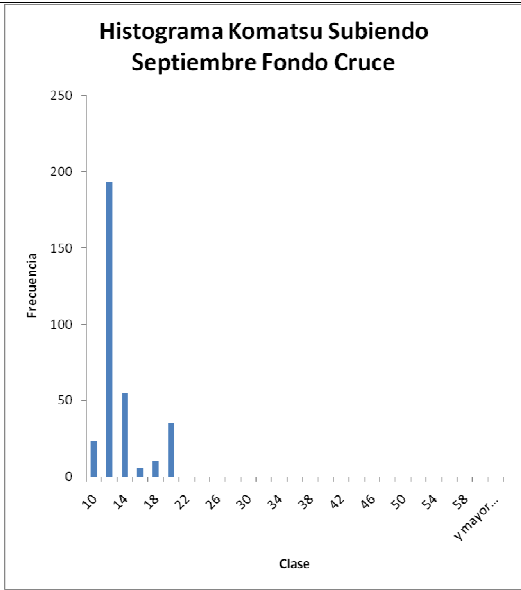
Kom-Subiendo Julio Fondo-Cruce

Media	11.7869427
Error típico	0.10975116
Mediana	11.0242953
Moda	#N/A
Desviación estándar	2.51471499
Varianza de la muestra	6.32379147
Curtosis	3.07268073
Coefficiente de asimetría	2.02072038
Rango	11.0829719
Mínimo	8.86555025
Máximo	19.9485221
Suma	6188.14493
Cuenta	525



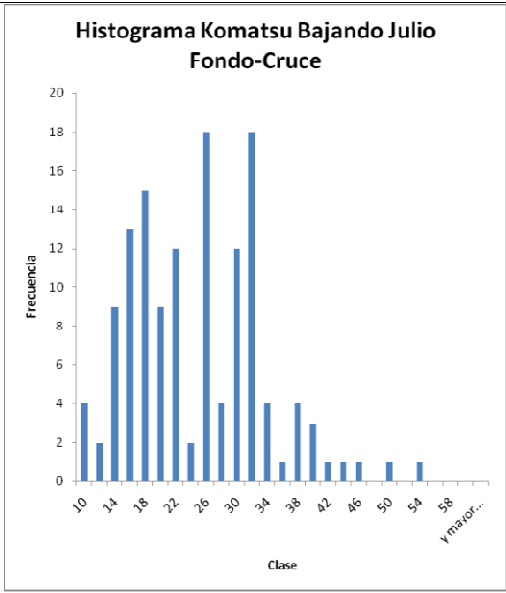
Kom-Subiendo Agosto Fondo-Cruce

Media	11.8341218
Error típico	0.13672511
Mediana	11.1339905
Moda	#N/A
Desviación estándar	2.53587302
Varianza de la muestra	6.43065197
Curtosis	3.04763372
Coefficiente de asimetría	1.96289973
Rango	11.103381
Mínimo	8.52331988
Máximo	19.6267009
Suma	4070.9379
Cuenta	344



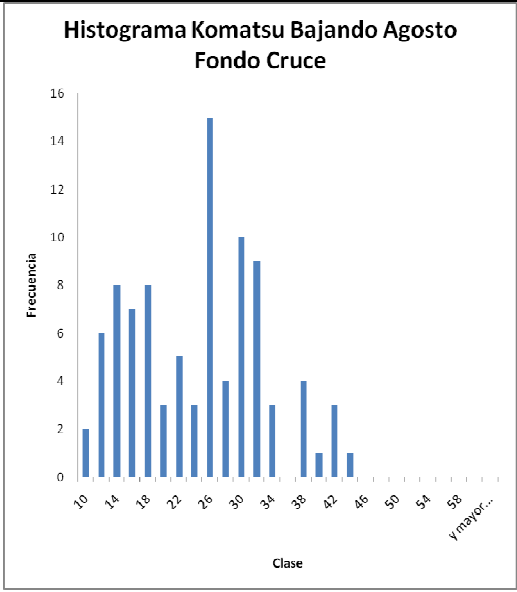
Kom-Subiendo Septiembre Fondo-Cruce

Media	12.3161636
Error típico	0.14832463
Mediana	11.3389382
Moda	#N/A
Desviación estándar	2.66159031
Varianza de la muestra	7.08406295
Curtosis	1.50168735
Coefficiente de asimetría	1.65909833
Rango	10.7080754
Mínimo	9.02826277
Máximo	19.7363382
Suma	3965.80468
Cuenta	322



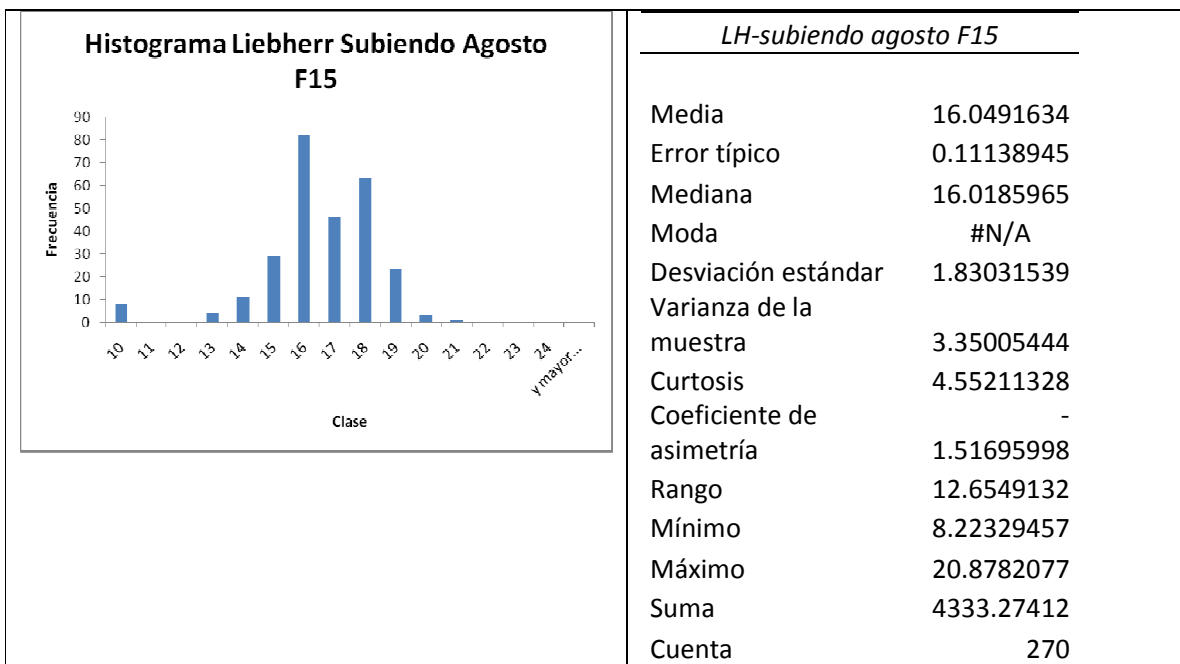
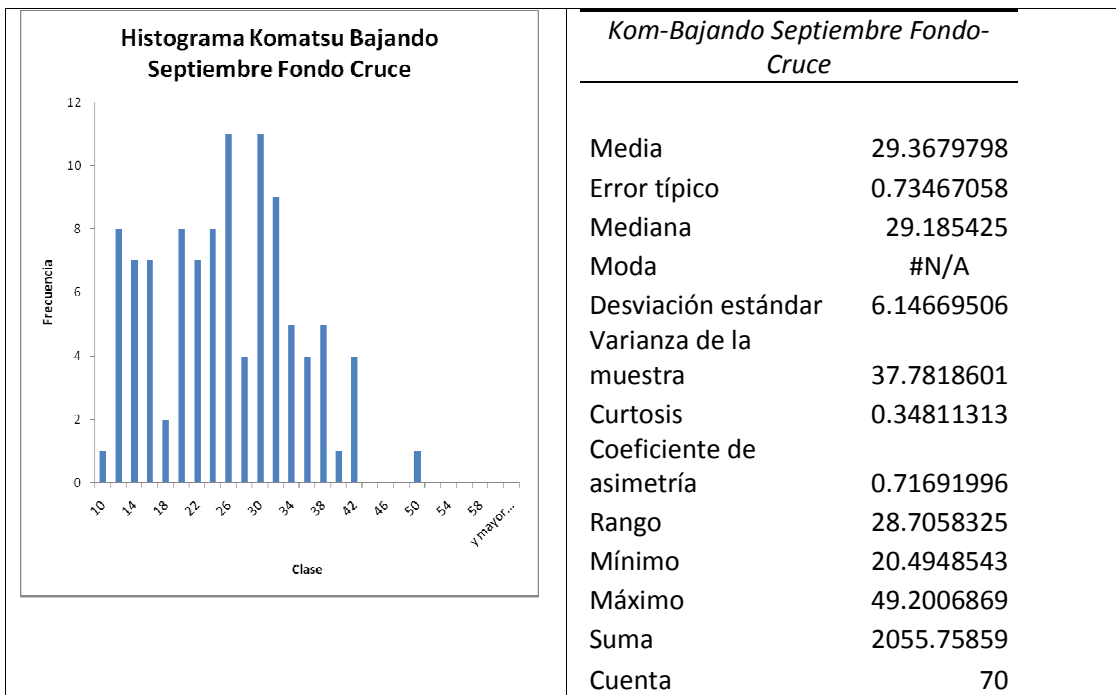
Kom-Bajando Julio Fondo-Cruce

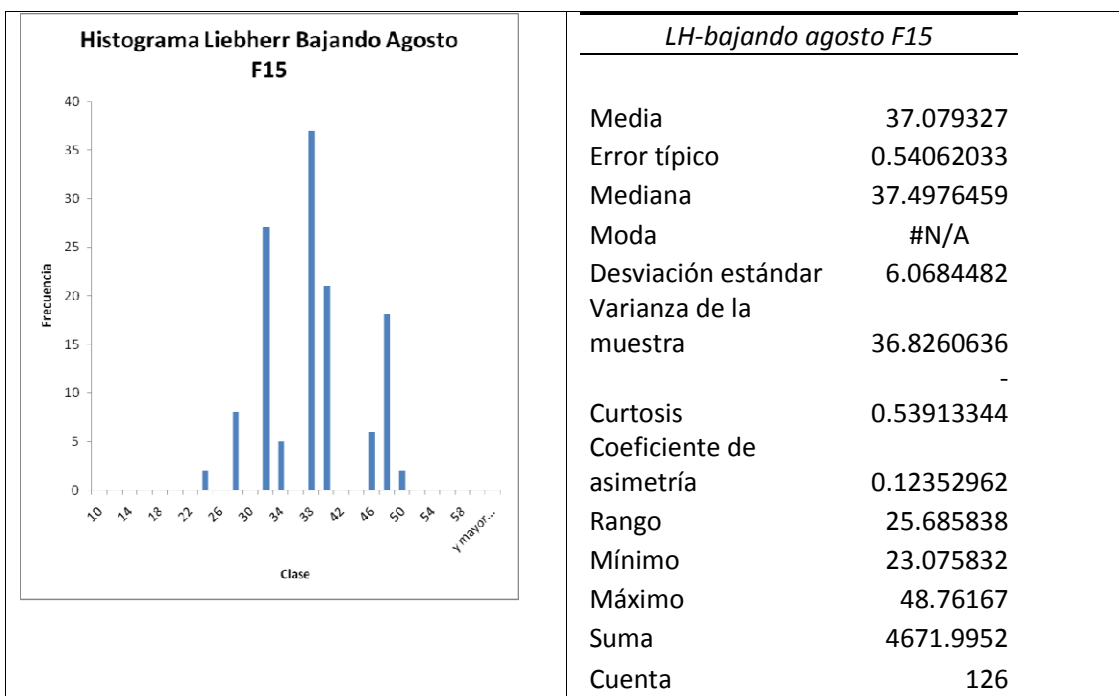
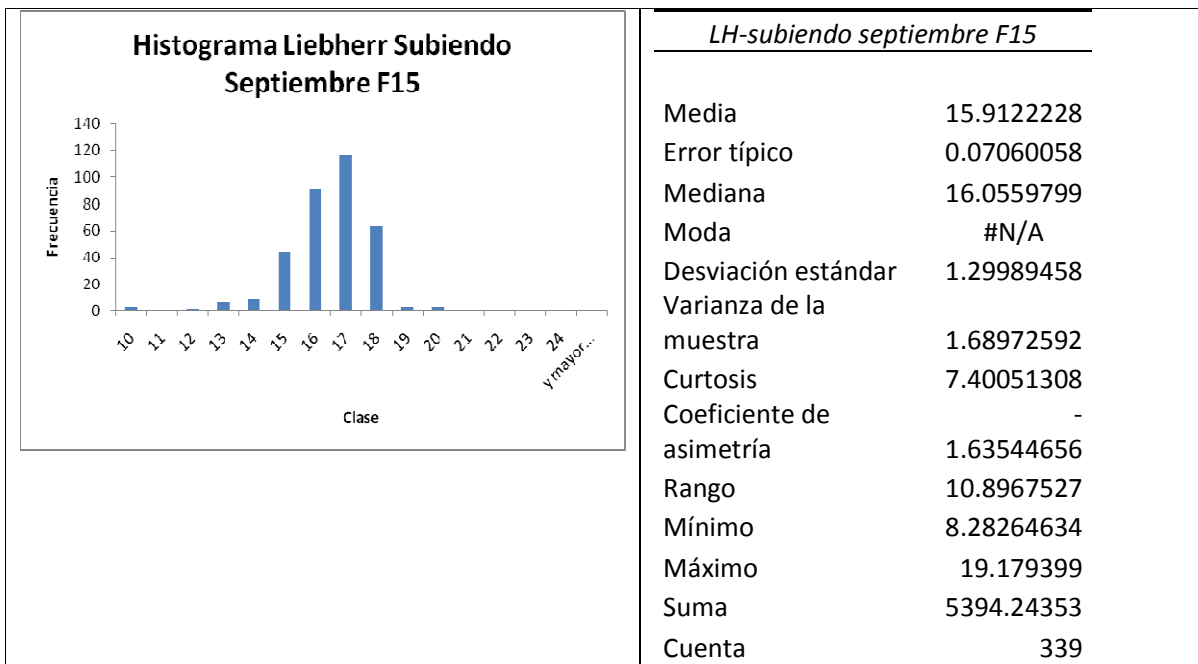
Media	29.1869089
Error típico	0.71609894
Mediana	28.9968437
Moda	#N/A
Desviación estándar	6.52397186
Varianza de la muestra	42.5622088
Curtosis	1.86018075
Coefficiente de asimetría	1.17487523
Rango	32.3770577
Mínimo	20.279872
Máximo	52.6569297
Suma	2422.51344
Cuenta	83

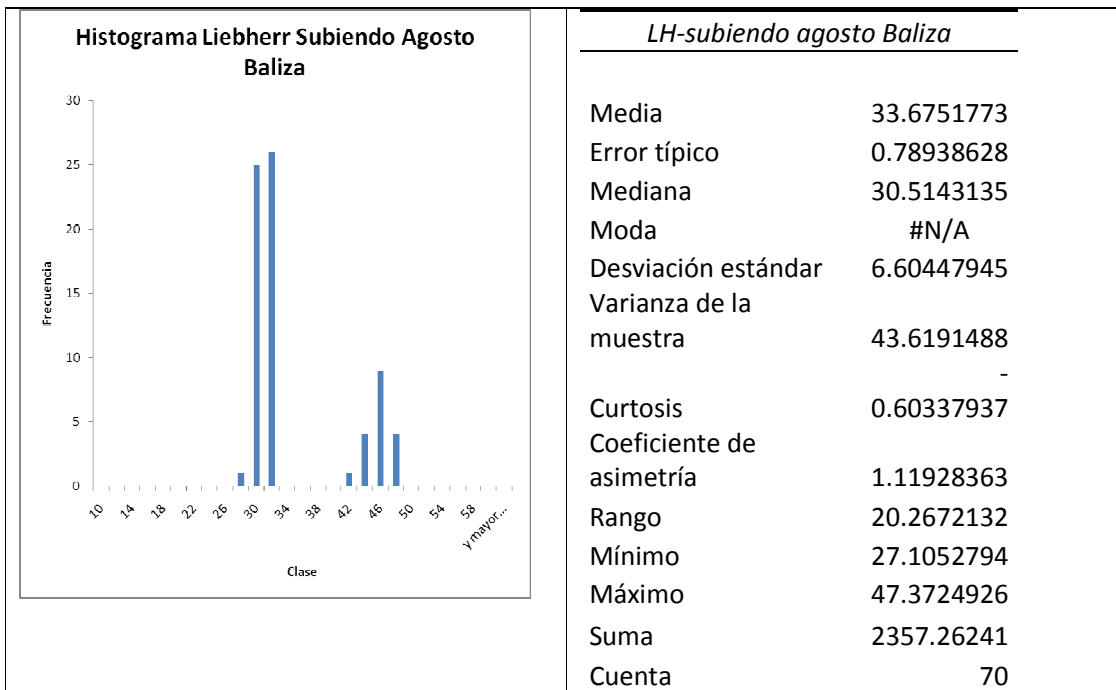
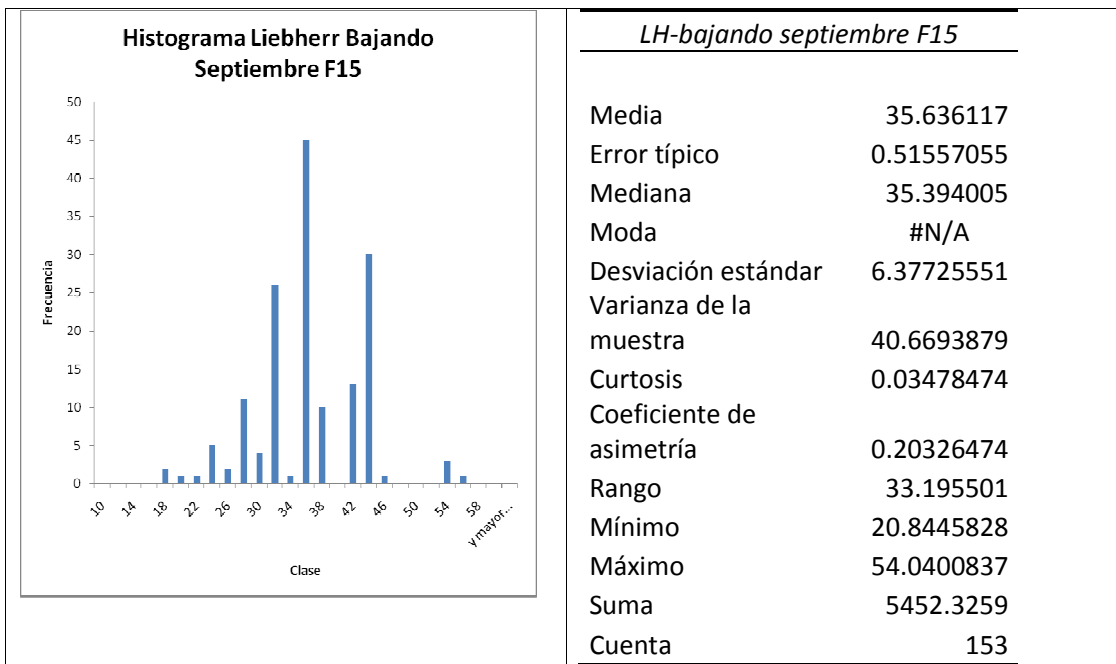


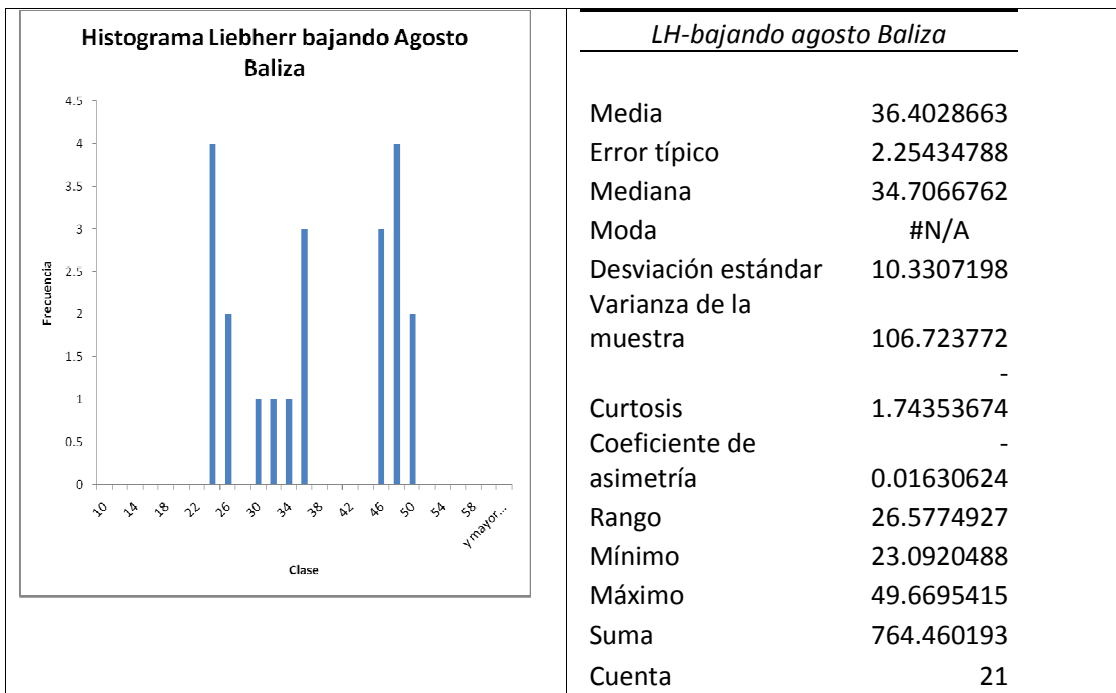
Kom-Bajando Agosto Fondo-Cruce

Media	28.9544176
Error típico	0.72580134
Mediana	29.0310377
Moda	#N/A
Desviación estándar	5.52753834
Varianza de la muestra	30.5536801
Curtosis	0.0749463
Coefficiente de asimetría	0.77342591
Rango	22.7347742
Mínimo	21.018408
Máximo	43.7531822
Suma	1679.35622
Cuenta	58









<i>LH-bajando agosto Baliza</i>	
Media	36.4028663
Error típico	2.25434788
Mediana	34.7066762
Moda	#N/A
Desviación estándar	10.3307198
Varianza de la muestra	106.723772
Curtosis	-
Coefficiente de asimetría	1.74353674
Rango	-
Mínimo	0.01630624
Máximo	26.5774927
Suma	23.0920488
Cuenta	49.6695415
	764.460193
	21

- Calculo de velocidades en el ejemplo de la “rampa tipo” de 6 km

Observaciones	Velocidades		Diferencias		Tiempo viaje		total	Dif prod	Diferencia de productividad
	cargado	vacio	Cargado	Vacio	cargado	vacio			
Rampa media de 6 kilometros con 60% de pendiente	17.2	42.5			20.9	8.5	29.4	9850	
40% con probabilidad de encuentro de 70%	16.4	28.9	-5%	-32%	22.0	12.5	34.5	8699	-12%
3 Switch backs	17.2	38.2	0%	-10%	20.9	9.4	30.4	9604	-3%
2 Entradas	17.2	39.7	0%	-7%	20.9	9.1	30.0	9699	-2%
2 Cambios	17.0	42.5	-1%	0%	21.2	8.5	29.7	9772	-1%