



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE MINAS

## EVALUACIÓN DE RIESGOS ASOCIADOS A PROCESO DE BALANCE METALÚRGICO

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

FELIPE BORGES ADJUTO

PROFESOR GUÍA:  
JUAN PABLO RODRIGUEZ MUÑOZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN  
XAVIER EMERY  
GABRIEL BERKOWITZ ARENDT

SANTIAGO DE CHILE

2024

## Resumen

Los procesos minero-metalúrgicos fundamentalmente requieren de mediciones para determinar las magnitudes de las variables más importantes para el desarrollo de la operación, que culmina en la venta de sus productos. A su vez, estas mediciones poseen un error asociado, el cual genera incertidumbres acerca de las variables del proceso, y por ende a los resultados esperados. A partir de esto nasce la interrogante de cómo se comportan estas incertidumbres y de que variables dependen, y finalmente como pueden afectar la economía estratégica de un proyecto. Debido a lo anterior, el objetivo de este estudio radica en desarrollar una metodología que permita identificar los principales riesgos asociados a un proceso de balance metalúrgico, como también evaluar los impactos asociados a cada riesgo.

La metodología desarrollada se basa en una serie de pasos secuenciales: Primeramente, se deben definir cuáles son las variables más significativas, como se definen sus valores y de qué manera se encuentran relacionadas en el modelo de balances. Luego se debe recolectar la información que aporta a la precisión de su definición (instrumentos y supuestos asociados al modelo de balance). A partir de lo anterior se determina la tolerancia (rango aceptable en que los valores pueden variar) mediante la teoría de propagación de errores. Finalmente se deben identificar cuáles son las variables que poseen una tolerancia asociada y que al mismo tiempo puedan generar retornos económicos, y propagar esta tolerancia a un valor contable, asociado a las ventas y a la recuperación metalúrgica en riesgo. Se complementa el estudio con un análisis de sensibilidad.

El caso de estudio se basó en la aplicación de la metodología a un modelo de balances masicos y de finos de cobre de una planta concentradora, con el objetivo de establecer un orden de magnitud de los resultados.

Como principales resultados, se obtuvo que existe en promedio de 2,15 MUSD en riesgo en inventarios durante el periodo de estudio, lo cual corresponde en promedio a 11,3 % de las ventas totales de concentrados del mismo periodo. Este riesgo esta principalmente asociado al proceso de determinación de las magnitudes de las masas y leyes de los inventarios del nodo de almacenamiento de concentrados, que son calculados a partir de la medición de volumen por topografía, cálculo de densidad por picnometría y análisis químico por volumetría. La principal variable que afecta este valor corresponde al error asociado a la determinación de densidad aparente, donde aporta aproximadamente el 66% del valor en riesgo asociado. Respecto a la recuperación metalúrgica, se tiene un promedio de 1,03 % de recuperación en riesgo. La principal variable que afecta a este valor es el error asociado al proceso de muestreo, dicho error aporta en promedio al 42 % del total del riesgo. La principal conclusión de este estudio es la fuerte dependencia del riesgo a la precisión de los instrumentos utilizados para la determinación de las variables relevantes, y la importancia de seguir un plan riguroso de calibraciones y procedimientos.

## Abstract

Mining and metallurgical processes fundamentally require measurements to determine the magnitudes of the most crucial variables for the operation, culminating in the sale of its products. These measurements have an associated error that generates uncertainties regarding the process variables and, consequently, the expected results. From this arises questions regarding the behavior of these uncertainties, what variables they depend on, and ultimately, how they can affect the strategic economic plan of a project. Due to the aforementioned reasons, the objective of this study is to develop a methodology that allows the identification of the main risks associated with a metallurgical balance process, as well as to evaluate the impacts associated with each risk.

The developed methodology is based on a series of sequential steps: Firstly, it is necessary to define the most significant variables in the process, how their values are determined, and how they relate to the metallurgical balance model. Then, the information related to the precision of their definition must be acquired, this mainly refers to the precision of the measuring instruments and the assumptions taken. From this information, the value of "tolerance" (acceptable range in which values can vary) is defined using error propagation theory. Finally, it is essential to identify the variables that have an associated tolerance and can simultaneously generate economic returns, propagating this tolerance to an accountable value associated with sales and metal recovery at risk. The study is complemented with a sensitivity analysis to determine which variables have the most impact on the calculated risk values.

The case study is based on the application of the methodology to a model of mass and copper balances in a concentrator plant, providing an example and establishing an order of magnitude of expected results. The analysis was carried out over a period of 3 months.

As the main results, it was found that there is an average of 2,15 million USD at risk in inventories during the study period, which corresponds, on average, to 11.3% of the total concentrate sales for the same period. This risk is mainly associated with the determination process of the magnitudes of the masses and grades of inventories in the concentrate storage node, calculated from volume measurement by topography, density calculation by pycnometry, and chemical analysis by volumetry. The main variable affecting this value is the error associated with density determination, contributing to approximately 66% of the associated risk value.

Regarding recovery, there is an average of 1.03% recovery at risk. The main variable affecting this value is the error associated with the sampling process, contributing on average to 42% of the total risk.

The main conclusion of this study is the strong dependence of risk on the precision of the instruments used to determine relevant variables and the importance of following a rigorous plan of calibrations and procedures.

## **Agradecimientos**

A todos los profesionales de Empírica, con quienes tuve la oportunidad de aprender durante el periodo del desarrollo de este estudio, y nunca negaron una solicitud de apoyo. En especial agradecer a mi guía Juan Pablo Rodríguez por la paciencia y las enseñanzas durante este periodo. A Gabriel Berkowitz por el apoyo en aspectos académicos, profesionales y personales. Finalmente, a Francisco Soto por la oportunidad de realizar este trabajo, como también por los diversos consejos entregados durante nuestras conversaciones.

A mis profesores de la Universidad de Chile, donde cada uno apporto en cierto grado a mi formación. En especial a Xavier Emery, por la disponibilidad y motivación en ser parte de mi comisión.

Agradecer a todos mis amigos, los momentos que compartimos aportaron de manera fundamental para mi desarrollo personal, lo que facilito mucho el camino.

A mi familia, por el sustento en las etapas más importantes de mi vida y el apoyo incondicional me han proporcionado. En específico a Luis, tanto por el sustento como también por los conocimientos transmitidos debido a su amplia experiencia en el mundo minero.

A mi pareja María José, por los buenos momentos que compartimos, el apoyo incondicional y por empujarme siempre para ser una mejor persona.

# 1. Tabla de Contenido

2.	Introducción.....	1
2.1	Contexto.....	1
2.2	Descripción del estudio .....	1
3.	Antecedentes .....	2
3.1	Variabilidad geológica .....	2
3.2	Muestreo .....	2
3.2.1	Error de preparación (PE) .....	5
3.2.2	Errores de delimitación (DE) y extracción (EE) .....	5
3.2.3	Errores de ponderación (WE) y de gran alcance periódico (QE3)....	5
3.2.4	Error fundamental (FE) y peso mínimo de muestra.....	6
3.3	Propagación de Errores .....	7
3.4	Balance metalúrgico.....	8
3.4.1	Reconciliación metalúrgica y Tolerancias .....	10
3.5	Normativas CNAM.....	11
3.5.1	CNAM 007.....	11
3.5.2	CNAM 014.....	15
3.5.3	CNAM 018.....	17
3.5.4	CNAM 020.....	19
3.5.5	CNAM 021.....	20
4.	Metodología .....	22
4.1	Definición de variables .....	22
4.2	Precisión de Mediciones .....	22
4.3	Cálculo de tolerancias.....	23
4.4	Análisis de riesgos .....	23
4.5	Análisis de sensibilidad .....	24
5.	Caso de estudio .....	26
5.1	Contexto.....	26
5.2	Calibración de equipos.....	26
5.3	Nodos.....	27
5.3.1	Nodo 1: Concentradora .....	27
5.3.2	Nodo 2: Planta Tratamiento de Relaves.....	28

5.3.3	Nodo 3: Planta de Moly .....	28
5.3.4	Nodo 4: Almacenamiento de Concentrado Moly .....	29
5.3.5	Nodo 5: Planta de filtrado .....	29
5.3.6	Nodo 6: Almacenamiento de Concentrado .....	29
5.4	Determinación de Flujos e Inventarios .....	30
5.4.1	FL_00_11_01: Mineral a Flotación .....	30
5.4.2	FL_00_11_02: Escoria Botadero a Flotación.....	30
5.4.3	FL_00_15_01 Concentrado Recuperado por Limpieza .....	30
5.4.4	FL_00_16_01 Concentrados Externos.....	31
5.4.5	FL_11_12_01 Relave .....	31
5.4.6	FL_11_13_01 Concentrado Mixto.....	31
5.4.7	FL_12_00_01 Relave Final .....	31
5.4.8	FL_12_00_02 Concentrado a Venta 1 .....	31
5.4.9	FL_12_16_01 Concentrado 2.....	32
5.4.10	FL_13_14_01 Concentrado Moly .....	32
5.4.11	FL_13_15_01 Concentrado Cobre .....	32
5.4.12	FL_14_00_01 Concentrado Moly a Ventas .....	32
5.4.13	FL_15_00_01 Limpiezas de Concentrado a Ventas .....	32
5.4.14	FL_15_00_02 Concentrado a Ventas 2.....	33
5.4.15	FL_15_00_03 Pérdidas por Manejo .....	33
5.4.16	Concentrado 1 .....	33
5.4.17	FL_16_00_01 Concentrado 1 a Ventas.....	33
5.4.18	FL_16_00_02 Pérdidas por Manejo en Almacenamiento .....	33
5.4.19	FL_16_00_03 Concentrado Escorias a Ventas .....	34
5.4.20	FL_16_20_01 Concentrado Directo a Silos.....	34
5.4.21	FL_16_20_02 Concentrado de Mezcla a Silos.....	34
5.4.22	INV_11_01 Inventario en Proceso Concentradora .....	34
5.4.23	INV_12_01 Inventario en Proceso Planta de Tratamiento de Relaves 34	
5.4.24	INV_13_01 Inventario en Proceso Planta de Moly .....	34
5.4.25	INV_13_02 Inventario Espesadores de Concentrado Mixto .....	34
5.4.26	INV_13_03 Inventario Espesadores de Concentrado Cobre.....	35
5.4.27	INV_14_01 Inventario Maxisacos Concentrado Moly .....	35

5.4.28	INV_15_01 Inventario en Proceso Planta de Filtrado.....	35
5.4.29	INV_15_02 Inventario Acopio de Concentrado.....	35
5.4.30	INV_15_03 Inventario en Proceso Planta de Filtrado.....	35
5.4.31	INV_16_01 Inventario Concentrados Corporativos en Canchas ....	35
5.4.32	INV_16_02 Inventario Concentrados Externos en Canchas .....	35
5.4.33	INV_16_02 Inventario Concentrados Propios en Canchas .....	36
5.4.34	INV_16_02 Inventario Concentrados Flotación de Escoria en Canchas	36
5.5	Consideraciones y Alcances .....	36
6.	Resultados .....	39
6.1	Variables relevantes .....	39
6.2	Tolerancias Relativas .....	39
6.3	Tolerancias Absolutas.....	43
6.4	Riesgos .....	50
6.5	Sensibilidad de variables.....	53
7.	Análisis de Resultados .....	61
7.1	Tolerancias .....	61
7.2	Riesgos .....	62
7.2.1	Riesgo Económico .....	62
7.2.2	Riesgo a la recuperación.....	64
7.3	Análisis de Sensibilidad.....	64
7.3.1	Impacto a los ingresos futuros en riesgo .....	64
7.3.2	Impacto a la recuperación en riesgo .....	65
8.	Conclusiones y Recomendaciones .....	67
9.	Bibliografía .....	70
10.	Anexos .....	72

## Índice de tablas

Tabla 1: Categorización de Errores .....	4
Tabla 2: Abertura mínima para pulpas .....	13
Tabla 3: Relación flujo-abertura, material seco.....	14
Tabla 4: Incertidumbre de determinación de variables .....	38
Tabla 5: Parámetros económicos. ....	50
Tabla 6: Valor en Riesgo, Mes 1 .....	50
Tabla 7: Valor en Riesgo, Mes 2.....	51
Tabla 8: Valor en Riesgo, Mes 3.....	51
Tabla 9: Recuperación en Riesgo, Mes 1.....	52
Tabla 10: Recuperación en Riesgo, Mes 2.....	52
Tabla 11: Recuperación en Riesgo, Mes 3. ....	53
Tabla 12: Magnitud del riesgo económico. ....	63



## Índice de ilustraciones

Figura 1: Efecto pipita in situ .....	4
Figura 2: Gráfico de Varianza del Error Fundamental .....	7
Figura 3: Cortador de flujo transversal .....	12
Figura 4: Abertura recomendada.....	14

## Índice de Gráficos

Gráfico 1: Tolerancias Relativas de Flujos, Mes 1 .....	40
Gráfico 2: Tolerancias Relativas de Inventarios, Mes 1 .....	40
Gráfico 3: Tolerancias Relativas de Flujos, Mes 2 .....	41
Gráfico 4: Tolerancias Relativas de Inventarios, Mes 2 .....	41
Gráfico 5: Tolerancias Relativas de Flujos, Mes 3 .....	42
Gráfico 6: Tolerancias Relativas de Inventarios, Mes 3 .....	42
Gráfico 7: Tolerancias Absolutas Máficas de Inventarios, Mes 1 .....	44
Gráfico 8: Tolerancias Absolutas de Finos de Cu en Inventarios, Mes 1 .....	44
Gráfico 9: Tolerancias Absolutas Máficas de Flujos, Mes 1 .....	45
Gráfico 10: Tolerancias Absolutas de Finos de Cu en Flujos, Mes 1 .....	45
Gráfico 11: Tolerancias Absolutas Máficas de Inventarios, Mes 2 .....	46
Gráfico 12: Tolerancias Absolutas de Finos de Cu en Inventarios, Mes 2 .....	46
Gráfico 13: Tolerancias Absolutas Máficas de Flujos, Mes 2 .....	47
Gráfico 14: Tolerancias Absolutas de Finos de Cu en Flujos, Mes 2 .....	47
Gráfico 15: Tolerancias Absolutas Máficas de Inventarios, Mes 3 .....	48
Gráfico 16: Tolerancias Absolutas de Finos de Cu en Inventarios, Mes 3 .....	48
Gráfico 17: Tolerancias Absolutas Máficas de Flujos, Mes 3 .....	49
Gráfico 18: Tolerancias Absolutas de Finos de Cu en Flujos, Mes 3 .....	49
Gráfico 19: Sensibilidad respecto al riesgo económico, Mes 1 .....	54
Gráfico 20: Sensibilidad respecto a la recuperación en riesgo, Mes 1 .....	54
Gráfico 21: Sensibilidad respecto al riesgo económico, Mes 2 .....	55
Gráfico 22: Sensibilidad respecto a la recuperación en riesgo, Mes 2 .....	55
Gráfico 23: Sensibilidad respecto al riesgo económico, Mes 3 .....	56
Gráfico 24: Sensibilidad respecto a la recuperación en riesgo, Mes 3 .....	56
Gráfico 25: Tornado Chart, incidencia sobre ingresos en riesgo .....	57
Gráfico 26: Tornado Chart, incidencia sobre recuperación en riesgo .....	57
Gráfico 27: Impacto Económico de Incertidumbres, Mes 1 .....	58
Gráfico 28: Impacto de incertidumbres a la recuperación en riesgo, Mes 1 .....	58
Gráfico 29: Impacto Económico de Incertidumbres, Mes 2 .....	59
Gráfico 30: Impacto de incertidumbres a la recuperación en riesgo, Mes 2 .....	59
Gráfico 31: Impacto Económico de Incertidumbres, Mes 3 .....	60



## **2. Introducción**

### **2.1 Contexto**

La industria minera requiere evaluaciones de riesgo financiero asociadas a los proyectos, procesos de planificación y también a sus balances financieros y, por ende, a sus procesos de balance metalúrgico. Estas evaluaciones son justificadas debido a que el negocio minero se caracteriza por requerir inversiones elevadas de capital para llevarse a cabo.

La industria emplea un sistema de entradas y salidas para poder verificar los resultados y rendimientos que permitan evaluar la calidad de las operaciones en cada una de sus líneas de procesamiento. El balance metalúrgico es utilizado para entregar la información oficial de tratamientos, producciones e inventarios, la cual es posteriormente valorizada por el área contable de la empresa minera.

En este contexto la información entregada por el balance metalúrgico es de alta importancia para el área financiera de la empresa, ya que sus informes determinan valorizaciones de flujos e inventarios, como también proporcionar cierto tipo de diagnóstico para poder remediar problemas.

Dado lo anterior se hace necesario contar con una metodología que permita evaluar el riesgo presente en las mediciones, cálculos y validaciones involucradas en el proceso de balance metalúrgico.

### **2.2 Descripción del estudio**

El estudio consiste en determinar los riesgos involucrados en el proceso de balance metalúrgico, y determinar posibles impactos. En detalle considerar los riesgos involucrados en las mediciones, tanto másicas como de leyes, determinaciones de inventarios, cálculos de KPI y reconciliación de datos.

Para lo anterior se deben considerar las incertidumbres y/o errores involucrados en estas mediciones, el desarrollo estadístico correspondiente y la posterior determinación de los riesgos involucrados, utilizando alguna aplicación existente para este fin.

El objetivo general del presente estudio es desarrollar una metodología que permita definir los principales riesgos asociados a un proceso de balance metalúrgicos y evaluar su impacto.

## **3. Antecedentes**

### **3.1 Variabilidad geológica**

De acuerdo con Fleischer (1969), al año 1969 se estimaba que existían alrededor de 2.000 tipos diferentes de minerales hasta el momento, pero destacaba que se descubrían nuevos minerales de forma regular. La revista National Geographic (2020) indica que este número actualmente se estima cerca de los 4.000, duplicando la estimación realizada 54 años atrás. Algunos minerales son abundantes en la corteza terrestre, como el cuarzo, feldespato, la mica y la calcita, que son componentes principales de la mayoría de las rocas. Otros son menos comunes y se encuentran en cantidades muy pequeñas, como algunos minerales de tierras raras o metales, que son fundamentales en el desarrollo tecnológico.

La composición mineralógica de la corteza terrestre varía ampliamente debido a una serie de factores, como la historia geológica (eventos geológicos que dieron origen a distintas estructuras como las fallas, por ejemplo), el tipo de roca y el ambiente geotérmico en el que se formaron. La distribución de minerales está fuertemente relacionada con la tectónica de placas y los procesos geológicos que ocurren en la Tierra, por ejemplo, la formación de minerales en zonas de subducción, donde una placa tectónica se sumerge bajo otra, generando una variedad de minerales debido a las altas temperaturas y presiones involucradas. Del mismo modo, la actividad volcánica e intrusiones magmáticas también pueden dar lugar a diferentes tipos de minerales (Skinner, 1979).

La variabilidad de minerales en la corteza terrestre es un tema intrínseco en la industria minera, y causa el principal desafío de esta industria: La estimación de recursos minerales presentes en un cuerpo mineralizado. Es importante destacar la implicación económica que tiene la variabilidad geológica, debido a que muchos minerales son recursos necesarios para la industria, agricultura, construcción y diversos otros sectores. La concentración de muchos de esos minerales en la corteza terrestre es baja por lo general (con excepción de algunos metales como el hierro, por ejemplo). Hallar y cuantificar concentraciones anómalas de minerales que justifiquen económicamente su extracción, implica un costo de inversión alto. La comprensión de este tema es fundamental para poder determinar y explotar estos recursos minerales.

### **3.2 Muestreo**

Una muestra es una parte de un material o lote, cuyo objetivo es representar el lote en las operaciones subsecuentes. Se obtiene por la unión de varios incrementos,

donde un incremento es un grupo de partículas (o una cantidad de gas o líquido que tenga sólidos suspendidos) extraído del lote en una sola operación del aparato que toma la muestra.

Las muestras utilizadas en los balances metalúrgicos generalmente provienen de pozos de tronadura, flujos de entrada y salidas de procesos, stockpiles, trenes, camiones y de barcos durante su carga y descarga. Para que la muestra sea representativa, todas las partes del material a ser muestreado (alimentación de mineral, concentrado, relaves, entre otros flujos) deben tener la misma probabilidad de ser elegidas y formar parte de la muestra a ser analizada (Gy, 2012). Un ejemplo de mala práctica en la etapa de muestreo es cuando se toman muestras de un estanque utilizando un cucharón, a una profundidad fija. Debido a que algunos de los contenidos de compuestos húmedos comúnmente decantan o flotan, resultando en una variación de sus concentraciones a distintas profundidades, por lo que la muestra retirada no sirve para entregar una idea general de la composición de esta solución (a excepción si se desea muestrear solamente la parte superior del estanque).

Se distingue dos componentes en un error de medición:

- **Precisión:** Según Smith (2010), la precisión se refiere a la capacidad de un instrumento o método para proporcionar resultados consistentes y reproducibles en mediciones repetidas. En términos estadísticos, la precisión también puede relacionarse con la variabilidad de los datos (Jones et al., 2015).
- **Exactitud:** La exactitud, por otro lado, se asocia comúnmente con la proximidad de una medición al valor verdadero o al estándar de referencia (Johnson, 2012). En este sentido, la exactitud aborda el sesgo en las mediciones.

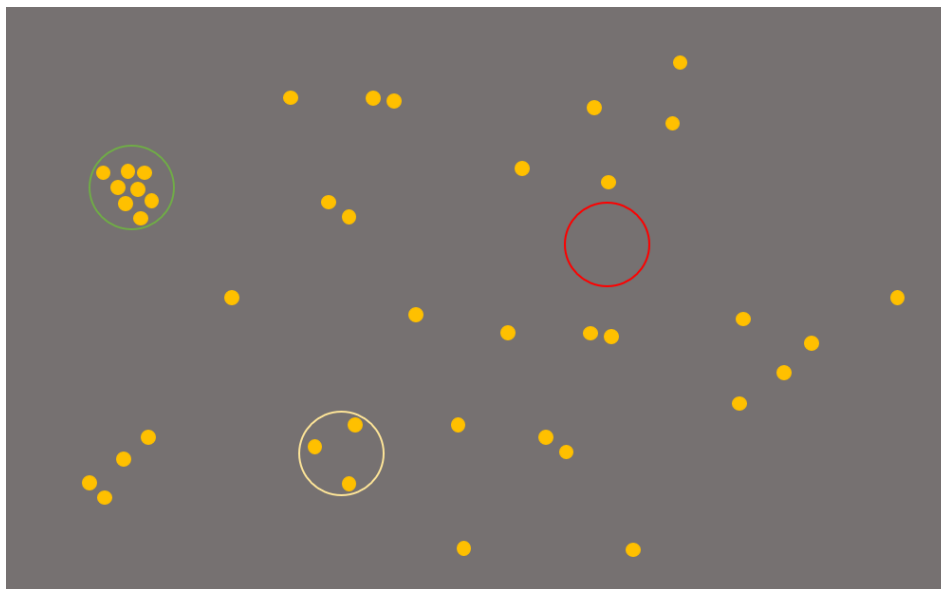
Mientras que la falta de precisión puede ser remediada aumentando el número de muestras y replicando su preparación y análisis, para luego calcular el promedio de las mediciones, pero al disponer de datos sesgados (inexactos), la técnica descrita anteriormente jamás solucionaría este problema. Algunas fuentes de sesgo pueden ser eliminadas, como la pérdida de material, contaminación y técnicas de extracción de muestras. Otras formas de sesgo pueden minimizarse, pero nunca eliminarlas por completo, como el cambio en la humedad, pérdidas por suspensión de material particulado y degradación de granulometría (Holmes, 2004).

Una fuente típica de error es el *efecto pepita*, que corresponde a la variabilidad que datos tomados en posiciones cercanas (caso espacial) o instantes cercanos (caso temporal) pueden presentar con respecto a otros. Según Pitard (2006), este efecto ocurre debido a 7 tipos distintos de variabilidad:

1. Variabilidad aleatoria in-situ de pequeña escala.

2. Variabilidad debido a heterogeneidad de constitución.
3. Variabilidad debido a heterogeneidad de distribución.
4. Variabilidad por cualquier tipo de desviación de un módulo de observación isotrópico, afectando la equiprobabilidad de elección de muestras.
5. Variabilidad por selectividad y una recuperación pobre de las muestras.
6. Variabilidad por contaminación, pérdidas y alteración de las propiedades químicas debido a error humano.
7. Variabilidad por método de análisis.

En la figura 1 se puede observar el error pepita in situ, causado por la gran variación en el tamaño de las pepitas. Asumiendo un mismo diámetro de sondaje, en el círculo verde en la figura se tiende a sobreestimar las leyes, mientras que en el rojo se tiende a subestimar las leyes.



**Figura 1: Efecto pepita in situ**

Gy (2012) categoriza las principales fuentes de errores asociadas al muestreo de acuerdo con su fuente y tipo de error cometido (Tabla 1).

**Tabla 1: Categorización de Errores**

Fuentes de error	Error	Tipo de Error
Caracterización del mineral	Efecto pepita in situ (INE)	Error verdadero
	Error fundamental (FE)	
	Error de agrupamiento y segregación (GSE)	Sesgo
Equipamiento de muestreo y manejo de materiales	Error de delimitación (DE)	
	Error de extracción (EE)	
	Error de preparación (PE)	
Procedimientos y procesos de planta	Error de ponderación (WE)	Error y sesgo
	Error continuo de selección (CSE)	

Proceso de análisis	Error analítico (AE)	
---------------------	----------------------	--

Gy (2012) y Pitard (2006) describen que el error total de la etapa  $i$  de muestreo, se puede dividir como la suma de todos los errores, acorde a la siguiente ecuación:

$$TE_i = FE_i + GSE_i + QE2_i + QE3_i + WE_i + DE_i + EE_i + PE_i$$

**Ecuación 1: Error de muestreo**

$QE2_i$  = Fluctuación de gran escala (largo alcance)

$QE3_i$  = Fluctuación periódica.

Las últimas 3 componentes de la ecuación 1 deben ser eliminadas, ya que producen sesgo de muestreo. Las demás componentes pueden ser minimizadas, pero nunca eliminadas completamente.  $QE2_i$  y  $QE3_i$  no siempre se aplican a todas las situaciones de muestreo, como por ejemplo muestreo de pozos de tronadura.

**3.2.1 Error de preparación (PE)**

Ocurre en operaciones no selectivas sin cambios de masa (chancado, molienda, transferencia, secado y mezcla de muestras, etc.). Incluyen contaminación, pérdida de masa, pérdida de humedad y errores humanos, como un error de etiquetado. Se puede eliminar utilizando buenos equipamientos y prácticas de muestreo.

**3.2.2 Errores de delimitación (DE) y extracción (EE)**

El error de delimitación ocurre al definir de manera incorrecta el área o volumen de donde se extraen los incrementos de la muestra. El error de extracción ocurre cuando los incrementos no son completamente extraídos (recuperación deficiente de la muestra).

**3.2.3 Errores de ponderación (WE) y de gran alcance periódico (QE3)**

El error de ponderación está asociado al muestreo en flujos móviles, ocurriendo cuando existen variaciones en las velocidades de los flujos. Esto causa que los incrementos no contengan el peso correcto cuando son combinados a muestras parciales. Este error puede ser remediado calibrando el flujo previo a la etapa de muestro.

Los errores de gran alcance periódico se asocian a flujos móviles. Surgen problemas cuando el intervalo de muestreo se asemeja al intervalo de variación, y la frecuencia de muestreo coincide con las frecuencias de variaciones periódicas.



### 3.2.4 Error fundamental (FE) y peso mínimo de muestra

El error fundamental surge debido a las diferencias de composición entre partículas individuales. Dado un tamaño de partícula, existe una masa mínima de la muestra ( $m_s$ ) que debe ser retenida luego de la división de la muestra para obtener una precisión adecuada. Tomando el supuesto que la masa del lote de donde se retiró la muestra es muy superior a la masa de la muestra, Gy (2012) demostró que la varianza del error fundamental está dada por:

$$\sigma^2_{FE} = \frac{clfgd^3a^2}{m_s}$$

#### Ecuación 2: Varianza del error fundamental

$a$  = Concentración fraccional de la partícula de interés.

$l$  = Factor de liberación de la partícula.

$d$  = Tamaño nominal de las partículas.

$c$  = Factor de composición mineralógica:

$$c = \frac{(1 - a)[(1 - a)p_1 + ap_2]}{a}$$

#### Ecuación 3: Factor de composición mineralógica

$p_1$  = Densidad de las partículas de interés.

$p_2$  = Densidad de las partículas de ganga.

$f$  = Factor de forma de la partícula (generalmente = 0,5).

$g$  = Factor granulométrico ( $0,25 < g < 1$ ). Se obtiene mediante la división  $\frac{d}{d'}$ , donde  $d'$  corresponde al tamaño bajo el cual se encuentran el 5% de las menores partículas.

Al aplicar la función logarítmica a ambos lados de la ecuación 2, se obtiene un gráfico log-log (Figura 2), que relaciona el máximo error aceptable con la masa de la muestra. Este gráfico es útil para definir protocolos de muestreo, fijando una línea horizontal donde se ubique el máximo error aceptado, y por una serie de procesos de división y conminución de la muestra, conseguir una muestra que se pueda analizar químicamente. Al dividir la muestra, se pierde cierta cantidad de información, lo que aumenta el error del proceso, pero el proceso de conminución disminuye el error asociado, dado que se liberan más partículas y se produce una mezcla más homogénea.

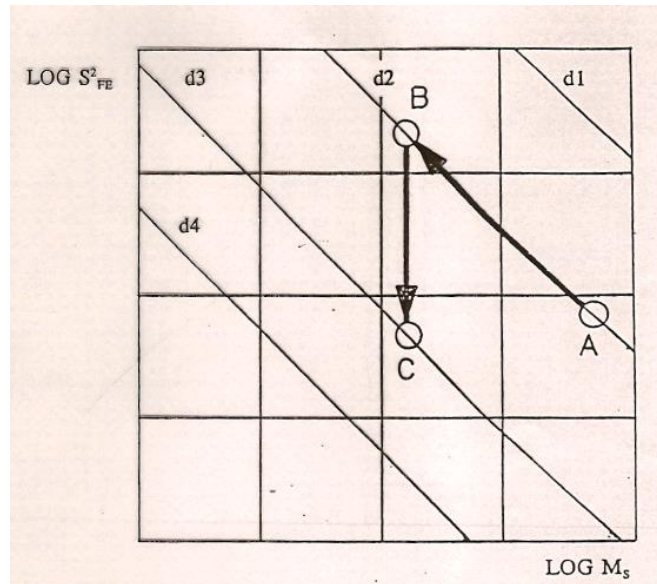


Figura 2: Gráfico de Varianza del Error Fundamental

### 3.3 Propagación de Errores

La propagación de errores es un concepto fundamental en la teoría de la medición y los cálculos científicos. La precisión de cualquier medición o resultado numérico se ve afectada por errores, y entender cómo estos se propagan a través de las operaciones matemáticas es esencial para evaluar la confiabilidad de los resultados (Taylor, 1997).

En términos más simples, la propagación de errores se utiliza para estimar cómo la incertidumbre en las variables de entrada afecta la incertidumbre en el resultado de un cálculo. Por ejemplo, si se mide la longitud y la anchura de un objeto y se utiliza esta información para calcular su área, la propagación de errores se utiliza para determinar la incertidumbre en el área calculada, teniendo en cuenta la incertidumbre en las medidas de longitud y anchura.

En el marco de la teoría de propagación de errores, se utiliza la derivada parcial para cuantificar cómo un error en una variable se traduce en un error en la variable resultante. La fórmula básica de propagación de errores es

$$\sigma_{f_T}^2 = \sum_{k=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial v_k} * \sigma_{v_k} \right)^2$$

#### **Ecuación 4: Formula general de propagación de errores.**

Donde  $\sigma_{f_T}$  es la desviación estándar de la variable de salida,  $v_k$ : variables de entrada involucradas en el cálculo de la variable de salida (Bevington & Robinson, 2003).

Esta teoría ha evolucionado para abordar problemas específicos en diversas disciplinas. Se han desarrollado métodos más sofisticados para tratar con correlaciones entre variables y para lidiar con situaciones no lineales. Algunos enfoques Bayesianos también se han integrado para proporcionar estimaciones más robustas de incertidumbre (Barlow, 1989).

Se aplica ampliamente en la investigación científica, ingeniería y en mediciones experimentales. Desde experimentos de laboratorio hasta cálculos de ingeniería, esta teoría proporciona herramientas cruciales para evaluar y comunicar la confiabilidad de los resultados (Taylor, 1997).

Es importante tener en cuenta que la propagación de errores no sirve para eliminar completamente la incertidumbre en una medición o cálculo. En cambio, se utiliza para proporcionar una estimación razonable de la incertidumbre en el resultado final, basada en la incertidumbre en las variables de entrada.

Cabe destacar que esta metodología para definición de errores, entrega una tolerancia sobre el valor de la variable que abarca un rango (valor medido  $\pm 1$  desviación estándar) que contiene el valor real con un 67% de probabilidad asumiendo una distribución normal (Bevington & Robinson, 2003).

### **3.4 Balance metalúrgico**

Diversas normas, tanto nacionales e internacionales (SAMREC (2016), JORC (2012), CRIRSCO (2019)), fueron creadas para asegurar la transparencia y confiabilidad en los reportes realizados por las compañías mineras. Un punto común entre las diversas normas radica en destacar que las estimaciones de recursos minerales no son exactas, dependen de la interpretación de datos asociados a localidad, forma y continuidad del cuerpo mineralizado y resultados provenientes del muestreo. Para aumentar la exactitud de las interpretaciones, se subdivide el modelo geológico, generando un modelo de bloques, en el cual cada bloque es clasificado como inferido, medido o indicado de acuerdo con el nivel de confianza que se tiene con respecto a ese bloque en específico, el cual aumenta al disponer de una mayor cantidad de información geológica cercana al bloque. Generalmente el mineral enviado a planta corresponde a los bloques clasificados como medidos (alto nivel de confianza), por lo que unos de los objetivos de la estimación de reservas es la extracción y entrega del mineral para su procesamiento a la ley estimada.

Según AMIRA (2007), el balance metalúrgico es la determinación a través de mediciones, análisis y computación, de la magnitud de cada componente de interés

referente a la planta (balance primario), o a lo largo de un diagrama de flujos (balance secundario). Según AMIRA (2007), el balance secundario es útil en identificar donde se ubican los inventarios de procesos, atrasos o problemas de medición.

El balance metalúrgico se ha utilizado en una variedad de contextos para evaluar la eficiencia de los procesos metalúrgicos. Según Smith et al. (2018), la aplicación del balance metalúrgico en la flotación de minerales ha sido crucial para optimizar la recuperación de metales valiosos.

Diferentes métodos de cálculo se han propuesto para realizar un balance metalúrgico preciso. En su trabajo, Jones (2016) destaca la importancia de considerar las pérdidas y ganancias en cada etapa del proceso, proponiendo un enfoque integral que abarque desde la extracción hasta la fundición.

A pesar de su utilidad, el balance metalúrgico enfrenta desafíos y limitaciones. Según Brown y White (2019), la variabilidad en la composición de los minerales y las condiciones operativas puede dificultar la precisión del balance, señalando la necesidad de enfoques adaptativos.

La investigación en balance metalúrgico continúa evolucionando para abordar desafíos emergentes y mejorar la precisión de las evaluaciones. Investigadores como García et al. (2020) proponen la integración de tecnologías avanzadas, como la inteligencia artificial, para optimizar la recopilación y análisis de datos en tiempo real.

Al disponer de desbalances en los nodos asociados a un proceso, se debe realizar una reconciliación metalúrgica, proceso basado en minimizar el desbalance mediante la modificación de los valores de flujos y/o inventarios de acuerdo con la tolerancia asociada a cada uno. Se dice que existen sobreajustes cuando se debe exceder la tolerancia absoluta asociada a un flujo o inventario para poder lograr un desbalance nulo.

Holmes (2004) define que el balance metalúrgico en el procesamiento de minerales utiliza a los análisis químicos, humedad y flujos de alimentación y productos para determinar la masa del metal. El mismo autor indica que el principal problema asociado al balance metalúrgico es la poca importancia atribuida a la etapa de muestreo, lo que resulta en obtener muestras que no son representativas. Esto se debe a que el diseño e instalación de los equipos automáticos de muestreo, seguido de la colección y preparación de muestras, comúnmente son asignados a personal que no atribuye una importancia significativa a la etapa de muestreo, no respetando las normas de calidad previamente establecidas. Cabe destacar la importancia de la correcta calibración de los equipos, y estimación de pérdidas de humedad por calibración.

Se basa en un cálculo que se realiza para evaluar y controlar el flujo y la distribución de elementos o compuestos metálicos en un proceso de producción. El objetivo del

balance metalúrgico es determinar la eficiencia del proceso y asegurar que la cantidad de metal introducida en el proceso sea igual a la cantidad de metal obtenida como producto final, teniendo en cuenta las pérdidas y ganancias del sistema. Una de sus finalidades es también determinar los más importantes KPI's (Key Performance Indicators).

El balance metalúrgico es una herramienta esencial en la optimización y control de los procesos metalúrgicos, dado que permite identificar pérdidas o ineficiencias, y tomar acciones para remediar estos problemas, mejorando la calidad del producto final. Es fundamental para la toma de decisiones operativas y estratégicas en la industria metalúrgica, ya que proporciona información valiosa para la planificación de la producción, estimación de costos y evaluación de desempeño del proceso (asociado a los KPI's).

Desde un punto de vista ecológico y en términos de sostenibilidad, permite identificar y controlar emisiones de contaminantes y residuos generados, contribuyendo a reducir los impactos ambientales y cumplir las normativas vigentes.

### **3.4.1 Reconciliación metalúrgica y Tolerancias**

Según los estudios de Rodríguez et al. (2017), la reconciliación metalúrgica ha sido clave para identificar desviaciones en la recuperación de metales valiosos, mejorando así la toma de decisiones operativas.

La literatura destaca diversos métodos y técnicas para llevar a cabo la reconciliación metalúrgica. En su trabajo, Smith y Johnson (2019) proponen un enfoque integrado que combina la reconciliación basada en el balance metalúrgico y el uso de tecnologías avanzadas, como la simulación por computadora, para mejorar la precisión de los resultados.

A pesar de su importancia, la reconciliación metalúrgica enfrenta desafíos inherentes. Investigadores como Brown y García (2021) señalan problemas relacionados con la variabilidad en las leyes de los minerales y proponen soluciones que incorporan técnicas estadísticas avanzadas para mitigar dicha variabilidad.

En términos simples, la reconciliación metalúrgica es el proceso de optimización donde se ajustan los valores de flujos e inventarios presentes en un proceso, a modo de minimizar el desbalance presente inicialmente.

La información requerida para llevar a cabo un proceso de reconciliación metalúrgica es:

1. Entradas y salidas de cada nodo representado matricialmente, donde se establecen como 1 las entradas y -1 las salidas de cada nodo/inventario.
2. Las dependencias entre flujos e inventarios. Esto es fundamental debido a que, al reconciliar un flujo o inventario, este puede afectar el valor de otro.

3. Los valores de los flujos e inventarios presentes en el modelo. Estos deben ser establecidos previo a la reconciliación metalúrgica, sea por medición, cálculo o estimación.
4. Las **tolerancias** asociadas a cada flujo o inventario: Corresponden al error relativo (cociente entre la desviación estándar del error y el valor real) de cada flujo o inventario. Las tolerancias son un parámetro fundamental en el proceso de balance metalúrgico, debido a que establecen el rango en el cual los valores ingresados pueden variar, funcionando como una restricción del sistema de ecuaciones.

El reconciliador metalúrgico procede a ajustar los valores ingresados de flujos e inventarios con el objetivo de eliminar el desbalance presente en el sistema. En el caso que no sea posible eliminar el desbalance, el reconciliador minimiza el desbalance por nodos y procede a iterar sobre estos valores con el mismo vector de tolerancias, generando **sobreajustes**. El proceso iterativo se repite hasta obtener un desbalance nulo, o hasta alcanzar un número máximo de iteraciones en el caso que no se logre conciliar el proceso en la iteración anterior.

### 3.5 Normativas CNAM

Las normativas CNAM fueron creadas por Codelco, con el fin de establecer condiciones y características principales para que las estaciones de muestreo sean aptas para entregar muestras correctas, con exactitud y precisión suficiente. Estas normativas son referencias a nivel nacional para la industria minera.

Establecen pautas generales que detallan especificaciones y protocolos de instalación, calibración, operación, mantención y verificación de los sistemas de muestreo.

#### 3.5.1 CNAM 007

Establece las normativas asociadas a las condiciones de las estaciones de muestreo de flujos de materiales y transferencia de productos, como también normas de seguridad que se deben seguir (no aplica a balance metalúrgico).

Define a un sistema de muestreo como: “conjunto de equipos que captan una parte del flujo (sólido o líquido) y lo separan de la corriente principal, con el fin de analizar el contenido de elementos de interés y/o sus características físicas.”

Primeramente, establece que cada incremento debe ser proporcional al flujo en el momento que se toma, esto implica que el peso total de la muestra al final de un turno es proporcional al tonelaje procesado durante ese turno.

### 3.5.1.1 Cortadores de flujo transversal

Son equipos de muestreo que cortan la totalidad de un flujo de manera transversal a velocidad constante.

En la figura 8 se muestran las condiciones para su correcto funcionamiento, se destaca la importancia de que el perímetro del cortador sea rectangular, y que las líneas que definen el intervalo  $\Delta t$  sean paralelas en el tiempo considerado.

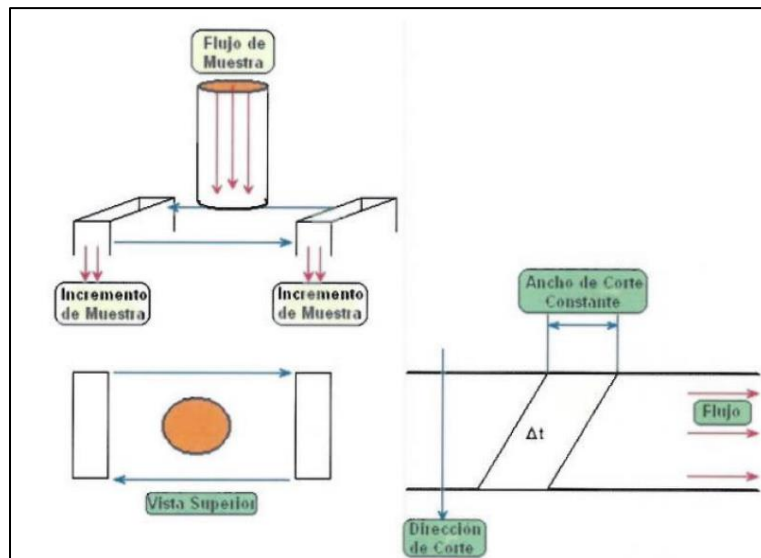


Figura 3: Cortador de flujo transversal

#### 3.5.1.1.1 Condiciones cinéticas

Se detalla que el cortador debe utilizar sistemas movidos mediante motores eléctricos, que la velocidad del cortador sea constante y que ésta se alcance antes de ingresar al flujo. La velocidad del cortador no debe superar los 45 cm/s. Para asegurar esto, se debe contar con un sistema de medición y control de velocidad.

Se detalla cómo se debe ubicar para evitar pérdidas, contaminación y accidentes.

#### 3.5.1.1.2 Extracción correcta

Para que se dé una extracción correcta, las hojas del cortador deben mantenerse siempre en posición paralela, independiente de la fuerza del flujo. En ángulo superior de las hojas no deben superar los  $20^\circ$ , y los bordes deben ser completamente simétricos respecto al centro del cortador. Para material seco con diámetro  $<50\text{mm}$ , se recomiendan hojas con un espesor en su parte superior de 2 a 5 mm. Para pulpas se recomiendan espesores de 0.5 a 1 mm.

El cortador debe tener una longitud que sea al menos 2 veces la altura del flujo máximo, con el fin de contener verticalmente todo el flujo.

La inclinación de los bordes del cortador debe ser perpendicular al flujo a muestrear.

### 3.5.1.1.3 Abertura y velocidad

Se establecen reglas para la relación entre abertura ( $W$ ) y velocidad ( $Ve$ ):

Para muestras sólidas y material particulado con diámetro  $d > 3$  mm, la abertura del cortador debe ser mayor o igual a 3 veces el diámetro de la partícula. Para pulpas donde  $d$  son menores a 3 mm, la abertura del cortador debe ser mayor o igual a 10 mm.

La velocidad del flujo debe en la ubicación del cortador debe ser siempre inferior a 2 m/s.

Se establece una relación entre el valor del flujo con la abertura recomendada, para las pulpas se recomiendan usar los valores de abertura indicados en la tabla 2, y la relación para flujos de sólidos se puede observar gráficamente en la figura 9.

**Tabla 2: Abertura mínima para pulpas**

Flujo de Pulpa ( $m^3/h$ )	$W_0 \geq$
[0-1000]	10 mm
[1,000-3,000]	20 mm
[3,000-5,000]	30 mm
$\geq 5,000$	50 mm



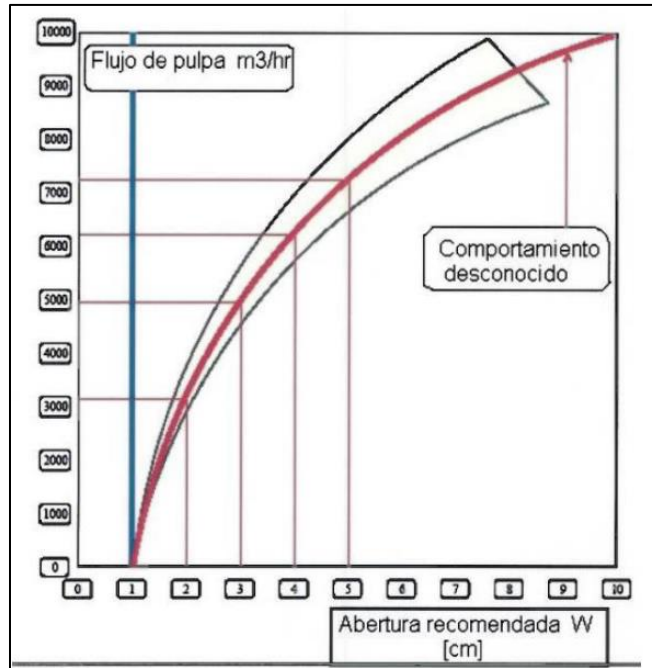


Figura 4: Abertura recomendada

### 3.5.1.2 Cortadores primarios para sólidos

Un material que no supera al 5% de humedad se considera como material seco.

Existen dos tecnologías para el muestreo:

- 1) Cortador de trayectoria recta con descarga inferior, no requiere espacio vertical excesivo, pero es más vulnerable a contaminaciones.
- 2) Trayectoria recta con placa deflectora, se requiere más espacio vertical y lateral, sella la muestra extraída, protegiéndola de la contaminación.

Las aberturas de los cortadores deben seguir las relaciones establecidas por la tabla 3:

Tabla 3: Relación flujo-abertura, material seco

Flujo (ton/h)	Abertura (cm)
[100-2000]	$3 \cdot d + 1$
[2000-4000]	$4 \cdot d$
[4000-6000]	$5 \cdot d$
$\geq 6000$	$6 \cdot d$

### **3.5.1.3 Cortadores para materiales húmedos y pegajosos**

Se hacen recomendaciones para sistemas de cortadores automáticos, donde se destaca la importancia de que no existan relieves al interior de las paredes del cortador, el espesor de 2 a 5 mm de los bordes superiores de hoja, acero inoxidable 316L o calidad superior, abertura del cortador levemente más angosta que su parte inferior (ancho mínimo de 5 cm y sobredimensionada). Ángulo de sus paredes > 60°.

Los cortadores de trayectoria circular se recomiendan para muestreos secundarios y terciarios en estaciones de muestreo a gran escala. Se debe cumplir que mantenga una velocidad constante de rotación en todo su largo. Ésta en el punto más lejano del centro de rotación con respecto al flujo, debe ser menor a 45 cm/s en el caso que el diámetro en ese punto sea mayor a 60 cm, y menor a 30 cm/s caso el diámetro sea menor a 60 cm.

La preparación del flujo se hace con el fin de minimizar el error de ponderación y calidad periódica. Si se presenta un flujo turbulento, se debe extender el flujo de forma horizontal, implicando un mayor recorrido del cortador. Se debe ubicar el sistema de muestreo donde se asegura un escurrimiento normal del fluido, la velocidad del flujo debe ser inferior a 2 m/s, aumentando su ancho en caso de superar este valor. La relación de pasadas entre cortador primario y cortador secundario es de 1/5, para cada corte realizado por el cortador primario, el cortador secundario realiza 5 cortes.

El sistema recolector de incrementos debe evitar salpicaduras, se debe asegurar una inclinación adecuada, su entrada debe ser asegurada con anillos para evitar contaminación y debe haber ventanas en la canaleta que permitan su lavado. Si la velocidad de flujo es muy grande en la canaleta se debe instalar un estanque acumulador entre cortador primario y que permita un paso más lento del flujo.

### **3.5.2 CNAM 014**

Detalla especificaciones técnicas y protocolos de instalación, verificación, calibración, como también tolerancias y cálculos de incertidumbre asociados a los sistemas de pesajes en correas transportadoras.

Establece que el equipo de pesaje para balance metalúrgico debe contar con al menos 4 polines asociados al pesómetro. El pesómetro debe ser flotante con una exactitud de al menos  $\pm 0.125\%$ . Las bancadas de polines deben tener rodillos auto lubricados con excentricidad menor a 0.4 mm, el ángulo de los polines debe ser igual o inferior a 35°.

Las celdas deben ser tipo strain gauge, operadas por tracción y se requieren 4 celdas para soportar el puente flotante.

El sensor de velocidad debe ser de tipo óptico y estar en ubicado en un lugar que no permita deslizamientos. La frecuencia máxima no debe sobrepasar 1 kHz.

La transmisión de señales debe ser hecha mediante tecnología digital por pulsos y no analógica.

Se deben seleccionar cadenas de calibración que permita un rango de calibración entre 60% y 80%.

Respecto a la instalación de los pesómetros: este y la correa deben ser independientes uno del otro y se debe seguir una ingeniería que los construya como un sistema integrado. El primer polín de pesaje debe estar a lo menos 5 metros o 5 espacios de polines desde el punto de alimentación de carga de la correa. No se deben haber curvas entre el pesómetro y el punto de carga. El pesómetro se debe instalar en una base estable y en una zona protegida de las distintas condiciones atmosféricas.

Las correas con sistema de pesaje deben tener un contrapeso del tipo gravitacional. Esta correa no debe tener longitud mayor a 300 metros ni menor a 12 metros. Éstas deben ser lo suficientemente flexibles para siempre estar en contacto con los rodillos de la zona de pesaje. Para caudales menores a 2,000 tph se acepta una desviación máxima de 5 cm de la correa debido a los impactos que sufren los polines en el punto de carga.

Los principales sistemas de verificación corresponden a:

- Ecuación o balance de celdas de carga.
- Gráfico de señales de celdas y tacómetro.
- Inspección de componentes de la correa.
- Calibración por prueba de material.

Se destaca que para balance metalúrgico se calibran los sistemas por prueba de material, y la calibración por carga simulada entre pruebas de material se deberá validar por este método. La prueba de material consiste en pasar una cantidad de material cuyo peso se conoce mediante el pesaje en una báscula estática clase (111), con una exactitud de 0.1%, permitiendo establecer el error de medición con una incertidumbre preestablecida. Para un balance de masa interno, se podrá aceptar una tolerancia de hasta 1%.

Antes de realizar una calibración luego de una detención (de más de un turno) la correa se debe operar por 20 minutos, y se debe realizar una inspección del sistema de pesaje. La calibración debe incluir por lo menos 3 revoluciones completas para tomar en cuenta las variaciones de grosor de la correa, y se recomiendan realizar 2 pruebas de material consecutivas en la puesta de marcha del sistema, para verificar su repetitividad.

Se deben realizar pruebas de material a cada 3 meses como máximo en puntos de control. En los puntos de transferencia comercial se efectuará a lo máximo cada un mes y/o cada vez que se genere un embarque.

Se deben informar los resultados de error, incertidumbre y tonelaje acumulado a las partes interesadas.

El sistema deberá ser calibrado mediante prueba de material cada vez que se someta a una intervención mayor, éstas son:

- Cambio de pesómetro o celdas de carga.
- Alineación de polines zona de pesaje.
- Reparación o cambio de correa.
- Modificación en el diseño del contrapeso.
- Cambio de polea motriz o de cola.

Las actividades relacionadas a calibraciones o ajustes deben mantenerse registradas por a lo menos 3 años.

En cuanto a la repetibilidad, al realizar más de una prueba, la diferencia de los resultados no puede exceder 0.25% para balance metalúrgico. Esta tolerancia se aplica a rangos de temperatura desde los -10°C hasta los +40°C.

Para las correas transportadoras, el flujo debe mantenerse entre el 30% y el 98% de la capacidad nominal de la correa, con alarmas y registros que indiquen si este se desvía.

Los ajustes al sistema deben ser realizados por personal calificado, y en el caso que los resultados se encuentren dentro del rango de tolerancia, no se deberán realizar ajustes al integrador.

La incertidumbre de la medición se determina a partir de parámetros estadísticos del equipo y los antecedentes proporcionados por el fabricante, como también sobre la base de condición de funcionamiento del sistema de pesaje.

Los puntos de acceso a los puntos de ajuste deben encontrarse sellados. La zona de pesaje debe ser monitoreada mediante circuito cerrado de televisión.

### **3.5.3 CNAM 018**

Establece condiciones y características para el sistema de muestreo de concentrados de cobre en camiones. Las características que debe tener este sistema para permitir la obtención de una muestra representativa son:

- Muestreo equiprobable.
- Poder configurar el número de incrementos y sus tamaños, como también la granulometría de distribución.

- Asegurar la integridad de la muestra.
- Asegurar que no exista pérdida de humedad.
- Permitir la limpieza de este para evitar contaminación.
- Permitir un muestreo que no dure más de 15 minutos.

Establece condiciones específicas para sistemas de muestreo en correas y también para sistemas de muestreo in situ:

- Sistema de muestreo en correas:
  - Contener una tolva de descarga junto a un alimentador al sistema de correas.
  - Cortadores de muestra de acuerdo con la norma CNAM 007.
  - Sistema de reducción de tamaño y embalaje de la muestra final.
  - Sistema de transporte a condición final.
  - Manejo de rechazos.
- Sistema de muestreo in situ:
  - Dispositivos intercambiables de recolección de muestra.
  - Capacidad de capturar la altura total de la carga.
  - Sistema de manipulación.
  - Configurable de acuerdo con los patrones de muestreo.
  - Debe poder asegurar el traslado de la totalidad de la muestra.
  - Reducción de tamaño de la muestra.
  - Embalaje.
  - Manejo de rechazos.

Establece que se debe preferir siempre el sistema de correas sobre el de muestreo in situ. Las condiciones que permiten optar por el método alternativo son:

- No existe el sistema de muestreo de correas, o no este operativo.
- Las operaciones de manejo de concentrado hacen el método tradicional inviable.
- El remanejo impacta negativamente al ambiente.

Se deben realizar los siguientes resguardos en el caso de utilizar el sistema alternativo de muestreo:

- El dispositivo de muestreo debe asegurar la integridad de la muestra, y su capacidad de penetración hasta un 90% de la altura de lecho de concentrado en el punto de muestreo.
- Concentrados de entrada o salida regulares a lo largo de 1 año deben contar con un estudio para la determinación de volumen de muestra.
- El volumen de muestra deberá ser respaldado por estudios estadísticos y variográficos que lo justifiquen.

- A nivel corporativo los estudios deberán ser incorporados a una base de datos común.
- En caso de recibir un concentrado no habitual cuyo material no esté en la base de datos se podrá utilizar el estudio estadístico de otra división para este material. En caso de que no esté en la base de datos se podrá emplear el estudio estadístico de un concentrado similar.
- Los estudios estadísticos deben ser actualizados cada vez que ocurra una variación significativa de composición y granulometría del concentrado.
- Se debe contar con un sistema de gestión de calidad.

Se establece como requerimiento operacional que no exista un intervalo superior a una hora entre el pesaje de camión y el muestreo.

Los concentrados con un exceso de humedad (generalmente sobre 10%), no pueden ser procesados por el sistema de muestreo de camiones.

En el caso opuesto (muy baja humedad), debe haber un énfasis en asegurar la integridad de la muestra.

#### **3.5.4 CNAM 020**

Establece una metodología para asegurar metrológicamente las basculas de pesaje de camiones.

Dentro de los contenidos de esta sección se encuentran las especificaciones técnicas de la estructura física (cimentación) donde se ubica la báscula, celdas de carga, plataforma de pesaje, terminal (panel de control), cajas de conexión y cables, software y accesorios.

Respecto a las normas, éstas se basan en la normativa internacional referente a la recomendación 76-1 de la Organización Internacional de Metrología Legal (OIML, 2006), como también al Decreto Supremo N°158 (Ministerio de Obras Públicas, 2015).

Para el peso de camiones en caminos públicos, define que la báscula de pesaje debe ser capaz de entregar el peso por eje individualmente, por conjunto y por total del vehículo. La precisión debe ser de  $\pm 60$  kg para el caso del pesaje de vehículo estático, y  $\pm 3\%$  en caso de que el vehículo se encuentre en movimiento en el rango de 1 a 6 km/h.

Para la disposición del sitio de la báscula, se debe considerar:

- Cantidad de camiones que se pesan por día.
- Si existe despacho de productos y recepción de materiales o insumos, se debe disponer de dos basculas.
- Vía de acceso lateral para calibración.

- Tolerancia de nivelación de plataforma de  $\pm 1$  mm para balanza de despacho de productos.

El operador de la báscula realiza principalmente un control visual. Con el fin de minimizar y diagnosticar los errores, cada operador debe tener una clave individual y guardar registro con información referente al pesaje. Es altamente recomendado que además del operador exista un sistema automatizado de registro de pesajes, tal que los operadores no puedan realizar modificaciones a estas bases de datos independientes.

### 3.5.5 CNAM 021

Esta norma hace referencia a la calibración de los flujómetros para balance metalúrgico, buscando estandarizar la normativa para asegurar la calidad de mediciones.

Destaca los estándares para los métodos de calibración más utilizados en la industria. Las principales recomendaciones para cada uno de ellos son:

- **Bancada:** Ensayos llevados a cabo en un ambiente controlado, instrumento retirado de la línea e instalada en una bancada. Se recomienda revisar los rangos de operación con los proveedores caso los flujos superen 1200 lt/min o los diámetros se alejen de 4 pulgadas. En general se realiza la calibración con agua. El plan de calibración sigue la línea:
  - Detener operación.
  - Retirar el flujómetro de la línea.
  - Trasladar el flujómetro hacia la bancada y ejecutar mediciones.
  - Detener operación.
  - Reinstalar flujómetro.
- **Trazadores:** Especialmente utilizado para grandes diámetros (hasta 30 pulgadas), con precisión entre 0,1 y 0,5%. Se mide la velocidad mediante la identificación de un trazador (concentración de algún elemento diferenciable) en el flujo. Se recomienda precaución en la elección del trazador, dado que pueden aparecer en forma natural en el flujo, deben ser solubles, no debe haber interferencia física o química con el flujo y se deben poder detectar fácilmente. Establecen los requisitos para este método y luego se sigue la siguiente línea:
  - Instalación de detectores.
  - Instalar sistema de inyección de trazadores seguido de la inyección.
- **Comparación:** Comparación entre instrumento instalado y de referencia mediante el uso de flujómetros (electromagnéticos, ultrasónicos, Sonartrac, por efecto Coriolis). Se debe seleccionar un flujómetro adecuado, siendo uno

de mayor precisión si se desea calibrar, o uno de igual o menor precisión si se desea contrastar.



## 4. Metodología

En esta sección, se detallará la metodología utilizada para poder lograr los resultados del estudio.

### 4.1 Definición de variables

Se deben definir las variables que afectan al valor económico del proyecto, y cómo se definen sus valores. Es importante reconocer si éstas corresponden a variables medidas o calculadas.

### 4.2 Precisión de Mediciones

Se debe identificar los puntos de mediciones y muestreo, y definir la tolerancia asociada a cada uno. Para esto es necesario contar con el reporte de calibraciones o contrastaciones de los equipos.

Se deben estimar los inventarios relevantes para el balance, se definen distintos métodos para calcularlos dependiendo de la información disponible:

1. Pesaje directo: El inventario se pesa directamente en basculas. Este método presenta un error pequeño comparado a los demás, sin embargo, no es factible su aplicación para inventarios muy grandes. Generalmente se emplea cuando se necesita un grado de tolerancia bajo (Ej: productos comerciales).
2. Estimación de masa por volumen y densidad: Este método se basa en calcular la masa del inventario mediante la multiplicación de su volumen por la densidad. Ideal para inventarios con una composición homogénea. En caso de que no se dé la condición anterior, se debe disponer de estudios periódicos de densidad para mantener una representatividad de este valor. Los métodos comúnmente utilizados para la estimación de volumen, ordenados de menor a mayor precisión son:
  - I. Estimación por geometría.
  - II. Medición manual mediante uso de varilla.
  - III. Sensores de nivel.
  - IV. Topografía.
3. Balance masico: Cuando se conoce el inventario inicial, se puede estimar el inventario final a partir de un balance del tipo:

$$\text{Inventario Final} = \text{Inventario Inicial} + \text{Entradas} - \text{Salidas}$$

El grado de incertidumbre de este inventario queda determinado por la tolerancia de medición de los flujos de entradas y salidas. Generalmente es más bajo cuando se miden en basculas, y aumenta en el caso que se mida con pesómetros o flujómetros.

4. Estimación: Se aplica a inventarios para los cuales la medición directa de sus contenidos es difícil, como por ejemplo el barro anódico en proceso de refinación.

Sus valores son estimados a partir de una fórmula que involucra entradas y salidas a este inventario.

A partir de las mediciones anteriores se pueden estimar sub-inventarios, o inventarios específicos por elementos, al conocer las concentraciones o leyes de minerales de interés. También se pueden estimar contenidos de sólidos o líquidos conociendo humedad, densidades, etc...

### 4.3 Cálculo de tolerancias

Caso una variable sea medida directamente, su tolerancia dependerá de la precisión del instrumento y del error dejado al momento de calibrar al equipo. Caso la determinación de su valor se obtenga a partir de una muestra, se debe incorporar el error de muestreo.

En el caso que el cálculo de una variable incluya el valor de otras variables con un error asociado, se debe utilizar la fórmula de propagación de errores para poder determinar el error asociado a la variable calculada.

Cabe destacar que esta metodología para definición de errores entrega una tolerancia sobre el valor de la variable que abarca un rango con un 67% de probabilidad de contener el valor real.

### 4.4 Análisis de riesgos

Al disponer del vector de tolerancias, se debe proceder con el análisis de riesgos, los cuales se dividen en dos partes:

- 1- **Riesgo a ingresos futuros:** Este riesgo se asocia a los inventarios que poseen productos recuperables comercialmente, y que se puedan vender. Para esto se debe valorizar el inventario de acuerdo con el tonelaje en riesgo de finos, precio del commodity y costo de venta:

$$I_R = Rm_i * (P_i - Cv_i)$$

**Ecuación 5: Ingresos recuperables en riesgo.**

Donde:

$I_R$ : Ingresos recuperables en riesgo.

$Rm_i$  : Masa en riesgo de la especie i.

$P_i$ : Precio de venta por unidad másica de la especie i.

$Cv_i$ : Costo de venta por unidad másica de la especie i.

- 2- Riesgo a la recuperación:** La recuperación en la presencia de inventarios debe considerar el fino obtenido a partir del mineral procesado, es decir:

$$Rec = \frac{TMF_E + TMF_{Ci}}{TMF_P}$$

**Ecuación 6: Recuperación de proceso.**

Donde:

$Rec$ : Recuperación del proceso.

$TMF$  : Tonelajes de finos.

$E$ : Entradas.

$Ci$ : Consumo de inventario.

$P$ : Productos.

Como las tolerancias asociadas a los productos comerciales son 0 (CNAM, 2017), el riesgo de la recuperación se encuentra directamente asociado a los riesgos de las entradas y consumos de inventario. Este riesgo se obtiene aplicando la fórmula de propagación de errores a la ecuación 6. Este riesgo no solo es de carácter económico, como también de carácter operacional, dado que puede indicar una sobrestimación o subestimación de la recuperación, y por consecuencia de la eficiencia del proceso.

## 4.5 Análisis de sensibilidad

Se debe realizar un análisis de sensibilidad sobre las variables que afectan a las tolerancias (precisión de instrumentos, errores de medición, etc), y como la variación de estos parámetros afectan al valor y a la recuperación en riesgo del proyecto.

El análisis se debe hacer aplicando una variación porcentual a las tolerancias y verificando como esta variación afecta al resultado, que para efectos de este estudio son la recuperación e ingresos en riesgo.

Finalmente se evalúa como afecta el resultado a eliminar cada error por completo, obteniendo una medida de cuanto aporta cada error al riesgo total.



## **5. Caso de estudio**

Como modo de ejemplo se aplicará la metodología descrita en la sección anterior al caso real de una planta, con valores modificados por motivos de confidencialidad.

### **5.1 Contexto**

Se analizará el proceso de balance metalúrgico para una planta concentradora de minerales de cobre en territorio nacional, propiedad de una compañía minera de gran relevancia a nivel nacional e internacional.

El modelo de balance de esta planta cuenta con 6 nodos (los nodos 7 y 8 pertenecen al modelo de balances de fundición), donde se tiene mineral y escoria como flujos de entrada y se obtiene concentrado y relave como los flujos de salida. Este modelo cuenta con 12 inventarios asociados.

La información disponible son datos asociados a entradas y salidas de la planta, flujos masicos, volumétricos y leyes/concentraciones de los elementos de interés. Se dispone de información de inventarios, la cual se encuentra reportada mensualmente con sus respectivos valores asociados. La calibración y sensibilidad de los instrumentos de medición también es uno de los inputs disponibles para realizar este estudio, la periodicidad de sus calibraciones/contrastaciones varía de equipo a equipo.

El modelo de balances de la planta, junto a los valores asociados a flujos e inventarios masicos, y leyes de cobre se adjuntan en la sección de anexos.

### **5.2 Calibración de equipos**

Las precisiones de los equipos usados para las mediciones fueron proporcionadas por la compañía, y corresponden al promedio entre el error dejado y el error hallado del equipo al momento de hacer la calibración. Sus valores se indican en la Tabla 4.

**Tabla 4: Precisión Básculas y Pesómetros.**

Instrumento	ID	Incertidumbre [%]
Básculas	B1	0,07
	B2	0,02
	B3	1,06
Pesómetros	P1	4,73
	P2	0,60
	P3	1,91
	P4	0,39
	P5	1,74
	P6	4,46
	P7	1,06

## 5.3 Nodos

Se detalla a especificación el instructivo que indica el método utilizado para determinar los valores de las variables asociadas a flujos e inventarios de cada nodo presente en la planta:

### 5.3.1 Nodo 1: Concentradora

Este nodo representa la concentración de cobre mediante las etapas de Chancado Primario, Secundario, Terciario, Molienda, Flotación Primaria, Remolienda y Circuito de Flotación Limpieza.

Ingresa mineral proveniente de la mina y también escoria histórica (de botadero), los que son chancados y luego llevados a un acopio del cual son transportados a la etapa de molienda. El producto de la molienda pasa a flotación, desde donde el concentrado mixto (Cu-Mo) resultante es enviado al nodo 3 Planta de Moly.

El relave de la flotación se envía a la planta recuperadora de agua, donde una torre de distribución reparte el relave a 3 espesadores de relaves, el relave resultante se traslada a la Planta de Tratamiento de Relaves (Nodo 2) mientras que el agua recuperada se alimenta a un pozo y se devuelve a la molienda primaria.

Los flujos de entrada de este nodo corresponden al **Mineral a Flotación FL\_00\_11\_01** y **Escoria Botadero a Flotación FL\_00\_11\_02**.

Los flujos de salida corresponden al **Relave FL\_11\_12\_01** y **Concentrado Mixto FL\_11\_13\_01**.

El inventario asociado a este nodo es el inventario **En Proceso Concentradora INV\_11\_01**.

### **5.3.2 Nodo 2: Planta Tratamiento de Relaves**

Este nodo corresponde a la Planta de Tratamiento de Relaves donde se recibe el relave proveniente del Nodo 1, planta concentradora.

Esta planta cuenta con 2 líneas de cascadas que procesan una porción del relave, generando un concentrado que se impulsa a una flotación primaria, el relave final sigue su curso gravitacional hasta el tranque. El circuito de flotación primaria produce un concentrado que se envía a flotación de limpieza constituida por 2 celdas de columnas.

Los flujos de entrada de este nodo corresponden a las **Escorias Botadero a Planta de Tratamiento de Relave FL\_00\_12\_01**, y el **Relave FL\_11\_12\_01**.

Los flujos de salida corresponden al **Relave Final FL\_12\_00\_01**, el **Concentrado a ventas FL\_12\_00\_02** y el **Concentrado 2 FL\_12\_16\_01** que se va a almacenamiento (Nodo 6).

Los inventarios de este nodo corresponden al inventario **En Proceso Planta Tratamiento de Relaves INV\_12\_01** e inventario de **Canchas de Secado INV\_12\_02**.

### **5.3.3 Nodo 3: Planta de Moly**

El relave de la Planta de Moly constituye el concentrado de cobre que se envía a la Planta de Filtros mediante un mineroducto.

El concentrado mixto, rico en cobre y molibdeno proveniente de la Concentradora (Nodo 1) ingresa a la Planta de Molibdeno, donde el concentrado mixto se alimenta a la flotación Rougher; el concentrado de molibdeno se envía a 3 columnas de limpieza, luego el producto de estas columnas se envía a un estanque de cocción, posteriormente a estanques decantadores, seguido por un proceso de filtrado y secado, generando un concentrado rico en molibdeno que se envía para su almacenamiento (Nodo 4). El relave de la Planta de Moly, constituye el concentrado de Cu que se envía a la Planta de Filtrado (Nodo 5).

El flujo de entrada corresponda al **FL\_11\_13\_01 Concentrado Mixto**.

Los flujos de salida de este nodo corresponden al **FL\_13\_14\_01 Concentrado Moly** y **FL\_13\_15\_01 Concentrado de Cobre**.

Este nodo posee tres inventarios asociados: **INV\_13\_01 En Proceso Planta Moly**, **INV\_13\_02 Espesadores de Concentrado Mixto** y **INV\_13\_01 Espesadores de Concentrado Cobre**.

#### **5.3.4 Nodo 4: Almacenamiento de Concentrado Moly**

Este nodo representa el almacenamiento del concentrado de molibdeno proveniente de la Planta Moly (Nodo 3). Desde acá el concentrado es enviado a ventas en maxisacos. Se considera el inventario conformado por los maxisacos de concentrado de molibdeno almacenados al cierre del período; este último debe estar loteado y con su respectivo análisis químico.

El flujo de entrada a este nodo corresponde al **FL\_13\_14\_01 Concentrado Moly**.

El flujo de salida de este nodo corresponde al **FL\_14\_00\_01 Concentrado Moly a Ventas**.

El inventario asociado a este nodo corresponde al **INV\_04\_01 Maxisacos Concentrado Moly**.

#### **5.3.5 Nodo 5: Planta de filtrado**

Este nodo representa la Planta de Filtrado cuyo objetivo es bajar el % de agua del concentrado recuperado por limpiezas y al concentrado de cobre proveniente de la Planta de Moly (Nodo 3) mediante filtros cerámicos. El concentrado se recibe en un estanque agitador que alimenta mediante una bomba a un circuito cerrado que abastece a cada filtro. El concentrado filtrado es enviado mediante un sistema de correas transportadoras a almacenamiento en acopio (Nodo 6) y a ventas.

Los flujos de entradas a este nodo corresponden a **FL\_00\_15\_01 Concentrado Recuperado por Limpiezas** y **FL\_13\_15\_01 Concentrado Cobre**.

Los flujos de salidas de este nodo corresponden a **FL\_15\_00\_01 Limpieza de Concentrado a Ventas**, **FL\_15\_00\_02 Concentrado a Ventas**, **FL\_15\_00\_03 Pérdidas por Manejo** y **FL\_15\_16\_01 Concentrado 1**.

Los inventarios asociados a este nodo corresponden a **INV\_15\_01 En Proceso Planta de Filtrado**, **INV\_15\_02 Acopio de Concentrado** y **INV\_15\_03 Canchas de Limpieza**.

#### **5.3.6 Nodo 6: Almacenamiento de Concentrado**

Representa el almacenamiento de los concentrados, entre los que están los concentrados externos, el concentrado de cobre proveniente de la Planta de Tratamiento de Relaves (Nodo 2), el concentrado de cobre de la Planta de Filtrado (Nodo 5) y concentrado de escoria de la Planta de Flotación de Escoria.

Las salidas con destino externo corresponden a concentrado de cobre a ventas; concentrado de escoria a ventas; y pérdidas por manejo. La salida de molibdeno es un ajuste para sacar el molibdeno del balance de cobre. Como salida con destino interno se tiene el concentrado de mezcla a silos y concentrado directo a silos, ambos a almacenamiento de concentrado para Fundición.



Los flujos de entrada a este nodo corresponden a **FL\_00\_16\_01 Concentrados Externos**, **FL\_12\_16\_01 Concentrado 2**, **FL\_15\_16\_01 Concentrado 1**, **FL\_31\_16\_01 Concentrado Escoria** y **FL\_90\_16\_01 Ajuste Salida Molibdeno**.

Los flujos de salidas de este nodo corresponden a **FL\_16\_00\_01 Concentrado a Ventas**, **FL\_16\_00\_02 Pérdidas por Manejo en Almacenamiento**, **FL\_16\_00\_03 Concentrado Escorias a Ventas**, **FL\_16\_20\_01 Concentrado Directo a Silos**, **FL\_16\_20\_02 Concentrado de Mezcla a Silos** y **FL\_16\_90\_01 Salida Molibdeno**.

Los inventarios asociados al nodo 6 son: **INV\_16\_01 Concentrados Externos en Canchas**, **INV\_16\_02 Concentrados Corporativos en Canchas**, **INV\_16\_03 Concentrados Propios en Canchas** y **INV\_16\_01 Concentrados Flotación de Escoria en Canchas**.

## **5.4 Determinación de Flujos e Inventarios**

Se detalla a continuación el método utilizado para determinar la magnitud del tonelaje y ley de cobre para cada uno de los flujos e inventarios presentes en la planta:

### **5.4.1 FL\_00\_11\_01: Mineral a Flotación**

El tonelaje se determina mediante las mediciones reportadas por los pesómetros P1-P5.

La ley de cobre es determinada por análisis químico por espectrometría a compuesto diario obtenida de muestra manual de descarga de las mismas correas.

### **5.4.2 FL\_00\_11\_02: Escoria Botadero a Flotación**

El tonelaje se determina mediante las mediciones reportadas por los pesómetros P1-P5.

La ley de cobre es determinada por análisis químico por espectrometría a compuesto diario obtenida de muestra manual de descarga de las mismas correas.

### **5.4.3 FL\_00\_15\_01 Concentrado Recuperado por Limpieza**

El volumen es obtenido a partir de un levantamiento topográfico. Se obtiene el tonelaje multiplicando el volumen por la densidad, la cual es obtenida por picnometría.

La ley de cobre se obtiene por análisis químico por volumetría obtenido de muestra manual.

#### **5.4.4 FL\_00\_16\_01 Concentrados Externos**

El tonelaje se obtiene mediante el valor reportado por las mediciones realizadas por la Báscula B2.

La ley de cobre se obtiene por análisis químico por volumetría obtenido de muestra manual.

#### **5.4.5 FL\_11\_12\_01 Relave**

El tonelaje se determina mediante un cálculo matemático a partir de variables de alimentación a flotación, concentrado mixto e inventario de proceso planta concentradora

Relave (FL\_11\_12\_01) = Alimentación (FL\_00\_11\_01 + FL\_00\_11\_02) - Concentrado (FL\_11\_13\_01) - variación de inventario en proceso (INV\_11\_01\_FINAL - INV\_11\_01\_INICIAL) .

La ley de cobre se obtiene por análisis químico por volumetría obtenido de muestra automático.

#### **5.4.6 FL\_11\_13\_01 Concentrado Mixto**

Cálculo matemático a partir de variables de concentrado Moly, concentrado de Cobre e inventario de procesos planta molibdeno.

Concentrado mixto (FL\_11\_13\_01) = Concentrado moly (FL\_13\_14\_01) + Concentrado de cobre (FL\_13\_15\_01) + variación de inventarios de proceso (INV\_13\_01 + INV\_13\_02 + INV\_13\_03)

La ley de cobre se obtiene por análisis químico por volumetría obtenido de muestra manual.

#### **5.4.7 FL\_12\_00\_01 Relave Final**

Cálculo matemático a partir de variables de alimentación a PTR y concentrado PTR.

Relave Final (FL\_12\_00\_01) = Alimentación (FL\_11\_12\_01 + FL\_00\_12\_01) - Concentrado DSAL Los Amarillos (FL\_12\_16\_01) - delta inventarios de proceso (INV\_12\_01+ INV\_12\_02) + Concentrado a Venta (FL\_12\_00\_02).

La ley de cobre se obtiene por análisis químico por volumetría obtenido de muestra automático.

#### **5.4.8 FL\_12\_00\_02 Concentrado a Venta 1**

Producto comercial.

El volumen es obtenido a partir de un levantamiento topográfico. Se obtiene el tonelaje multiplicando el volumen por la densidad, la cual es obtenida por picnometría.

La ley de cobre se obtiene por análisis químico por volumetría obtenido de muestra manual.

#### **5.4.9 FL\_12\_16\_01 Concentrado 2**

El tonelaje se obtiene mediante el valor reportado por las mediciones realizadas por la Báscula B2.

La ley de cobre se obtiene por análisis químico por volumetría obtenido de muestra automático.

#### **5.4.10 FL\_13\_14\_01 Concentrado Moly**

Producto comercial.

El tonelaje se obtiene mediante el valor reportado por las mediciones realizadas por bascula comercial.

La ley de molibdeno se obtiene por análisis químico por volumetría obtenido por muestreo manual.

#### **5.4.11 FL\_13\_15\_01 Concentrado Cobre**

Tonelaje obtenido mediante mediciones reportadas por el pesómetro P7.

La ley de cobre se obtiene por análisis químico por volumetría obtenido de muestra automático.

#### **5.4.12 FL\_14\_00\_01 Concentrado Moly a Ventas**

Producto comercial.

El tonelaje se obtiene mediante el valor reportado por las mediciones realizadas por bascula comercial.

La ley de molibdeno se obtiene por análisis químico por volumetría obtenido de muestreo manual de los maxisacos de concentrado.

#### **5.4.13 FL\_15\_00\_01 Limpiezas de Concentrado a Ventas**

El volumen es obtenido a partir de un levantamiento topográfico. Se obtiene el tonelaje multiplicando el volumen por la densidad, la cual es obtenida por picnometría.

La ley de cobre se obtiene por análisis químico por volumetría obtenido de muestra manual.

#### **5.4.14 FL\_15\_00\_02 Concentrado a Ventas 2**

Producto comercial

El tonelaje se obtiene mediante el valor reportado por las mediciones realizadas por la Báscula B3.

La ley de cobre se obtiene por análisis químico por volumetría obtenido de muestra manual.

#### **5.4.15 FL\_15\_00\_03 Pérdidas por Manejo**

Corresponde a 1% del valor del flujo FL\_13\_15\_01. Este es un valor fijo determinado por la empresa a partir de un estudio previamente realizado (se considera como criterio experto para los fines de este estudio).

No se realiza análisis químico.

#### **5.4.16 Concentrado 1**

El tonelaje se obtiene mediante el valor reportado por las mediciones realizadas por la Báscula B2.

La ley de cobre se obtiene por análisis químico por volumetría obtenido de muestra automática.

#### **5.4.17 FL\_16\_00\_01 Concentrado 1 a Ventas**

Producto comercial.

El tonelaje se obtiene mediante el valor reportado por las mediciones realizadas por la Báscula B2.

La ley de cobre se obtiene por análisis químico por volumetría obtenido de muestra automática.

#### **5.4.18 FL\_16\_00\_02 Pérdidas por Manejo en Almacenamiento**

El tonelaje se determina por cálculo matemático a partir de la recepción de concentrado; éste corresponde a la recepción total multiplicado por el factor asociado al manejo de los concentrados que es hasta un 1%.

Pérdidas por Manejo (FL\_16\_00\_02) = Factor de Pérdidas por Manejo \* [Concentrado 2 (FL\_12\_16\_01) + Concentrado DSAL (FL\_15\_16\_01) + Concentrados Externos (FL\_00\_16\_01)] .

La ley de cobre corresponde a la ley de cobre total de la recepción de concentrados.

#### **5.4.19 FL\_16\_00\_03 Concentrado Escorias a Ventas**

Producto comercial.

El tonelaje se obtiene mediante el valor reportado por las mediciones realizadas por la Báscula B2.

La ley de cobre se obtiene por análisis químico por volumetría obtenido de muestra automática.

#### **5.4.20 FL\_16\_20\_01 Concentrado Directo a Silos**

El tonelaje se obtiene mediante el valor reportado por las mediciones realizadas por la Báscula B2.

La ley de cobre se obtiene por análisis químico por volumetría obtenido de muestra automática.

#### **5.4.21 FL\_16\_20\_02 Concentrado de Mezcla a Silos**

El tonelaje se obtiene a partir de los valores reportados por el pesómetro P6.

La ley de cobre se obtiene por análisis químico por volumetría obtenido de muestra manual.

#### **5.4.22 INV\_11\_01 Inventario en Proceso Concentradora**

El tonelaje es un dato fijo (14.500 TMS), proporcionado por la empresa.

La ley de cobre es dato fijo = 0,3%, proporcionado por la empresa.

#### **5.4.23 INV\_12\_01 Inventario en Proceso Planta de Tratamiento de Relaves**

El valor de este inventario es 0.

#### **5.4.24 INV\_13\_01 Inventario en Proceso Planta de Moly**

El tonelaje es dato fijo (1,5 TMS) , proporcionado por la empresa..

La ley de cobre es la ley promedio de la producción mensual de Planta de Moly.

#### **5.4.25 INV\_13\_02 Inventario Espesadores de Concentrado Mixto**

El tonelaje es dato fijo (570 TMS) , proporcionado por la empresa..

La ley de cobre corresponde al promedio mensual del concentrado columna.

#### **5.4.26 INV\_13\_03 Inventario Espesadores de Concentrado Cobre**

El tonelaje es dato fijo (570 TMS) , proporcionado por la empresa..

La ley de cobre corresponde al promedio mensual del Concentrado Cola Moly.

#### **5.4.27 INV\_14\_01 Inventario Maxisacos Concentrado Moly**

El tonelaje se obtiene por pesaje directo, descontando la humedad.

La ley de cobre se determina por análisis químico.

#### **5.4.28 INV\_15\_01 Inventario en Proceso Planta de Filtrado**

El inventario se obtiene a partir del nivel de llenado del espesador, multiplicado por 500 TMS.

La ley de cobre se determina por análisis químico.

#### **5.4.29 INV\_15\_02 Inventario Acopio de Concentrado**

El inventario se obtiene mediante el balance de entradas y salidas con el valor de inventario inicial, tanto para el tonelaje como para los finos de cobre.

La entrada corresponde al **FL\_13\_15\_01 Concentrado de Cobre**, mientras que la salida asociada a este inventario corresponde al **FL\_15\_00\_02 Concentrado a Ventas**.

#### **5.4.30 INV\_15\_03 Inventario en Proceso Planta de Filtrado**

El tonelaje se obtiene multiplicando el volumen obtenido por topografía por la densidad, la cual es obtenida por picnometría.

La ley de cobre se determina por análisis químico.

#### **5.4.31 INV\_16\_01 Inventario Concentrados Corporativos en Canchas**

El tonelaje se obtiene multiplicando el volumen obtenido por topografía por la densidad, la cual es obtenida por picnometría.

La ley de cobre se determina por análisis químico (volumetría).

#### **5.4.32 INV\_16\_02 Inventario Concentrados Externos en Canchas**

El tonelaje se obtiene multiplicando el volumen obtenido por topografía por la densidad, la cual es obtenida por picnometría.

La ley de cobre se determina por análisis químico (volumetría).

#### **5.4.33 INV\_16\_02 Inventario Concentrados Propios en Canchas**

El tonelaje se obtiene multiplicando el volumen obtenido por topografía por la densidad, la cual es obtenida por picnometría.

La ley de cobre se determina por análisis químico (volumetría).

#### **5.4.34 INV\_16\_02 Inventario Concentrados Flotación de Escoria en Canchas**

El tonelaje se obtiene multiplicando el volumen obtenido por topografía por la densidad, la cual es obtenida por picnometría.

La ley de cobre se determina por análisis químico (volumetría).

### **5.5 Consideraciones y Alcances**

Las siguientes consideraciones y alcances fueron considerados/as para el desarrollo del caso de estudio:

- 1) Se considerará el tonelaje seco reportado por la planta, no llevando en consideración el error asociado a la determinación de humedad en los flujos/inventarios, dado que este cálculo varía caso a caso y no se dispone de la información requerida para determinar la tolerancia asociada.
- 2) Se considerará únicamente la tolerancia de mediciones y estimaciones de flujos como la incertidumbre asociada al proceso de balance metalúrgico. No se considerará el error humano asociado al proceso debido a que no es factible definir su ocurrencia y magnitud con la información proporcionada.
- 3) Este estudio se acotará al balance masico y de finos de cobre.
- 4) Caso un flujo presente valor 0 o un inventario no tenga variaciones en cierto período, la tolerancia asociada será de 0 para ese período.
- 5) De acuerdo a las normativas CNAM que definen los estándares para balances metalúrgicos, la tolerancia de los flujos e inventarios comerciales se considera 0.
- 6) Se considerará únicamente el impacto a los ingresos económicos de la planta, para un periodo de 3 meses, debido a que no se cuenta con la información requerida para determinar el impacto a los costos de proceso.
- 7) El precio del cobre para el período analizado será de 3,75 USD/lb.

- 8) La correlación entre variables no son parte del alcance del presente estudio, por lo que no se considerará para los cálculos. Esto también implica que no se considerarán análisis por ineficiencia.
- 9) En la Tabla 5 se reportan los valores para las incertidumbres asociadas a los procesos de medición y muestreo, proporcionados por la empresa:



**Tabla 4: Incertidumbre de determinación de variables**

<b>Tipo de Error</b>	<b>Incertidumbre [%]</b>
Determinación de Densidad	3,50
Medición de Volumen (Topografía)	1,80
Medición de Volumen (Sensores de nivel)	3,20
Medición de Volumen (Varilla)	4,60
Muestreo manual	2,50
Muestreo automático	1,00
Análisis Cu Espectrometría	2,00
Análisis Cu Volumetría	1,00

## 6. Resultados

En esta sección se presentarán los principales resultados obtenidos durante el estudio.

### 6.1 Variables relevantes

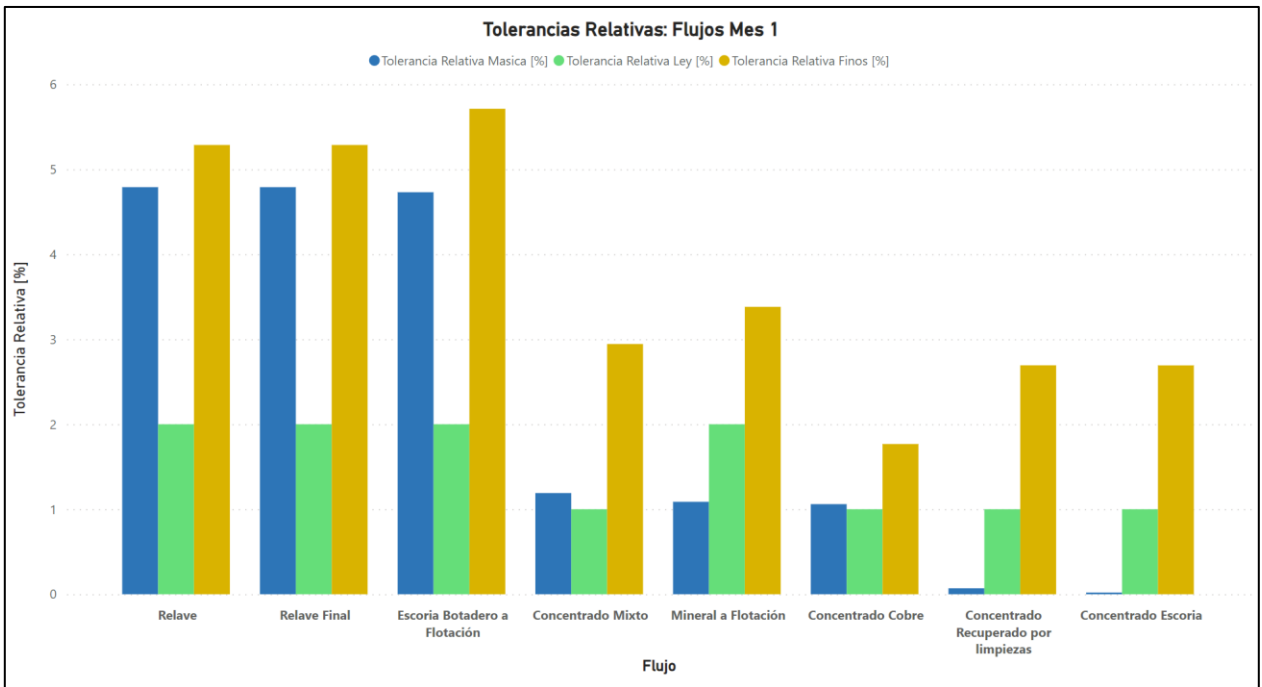
Las variables más relevantes para el cálculo de las tolerancias y consecuentemente los riesgos asociados al proyecto son:

- Flujos másicos.
- Tonelaje de inventarios.
- Volumen.
- Densidad.
- Consumo (o acumulación) de inventarios (Inventario Inicial – Inventario Final).
- Ley de Cobre.
- Recuperación metalúrgica.
- Humedad.
- Calibraciones de instrumentos.
- Errores de procedimientos.
- Precio del Cobre.
- Tarifas TC/RC.

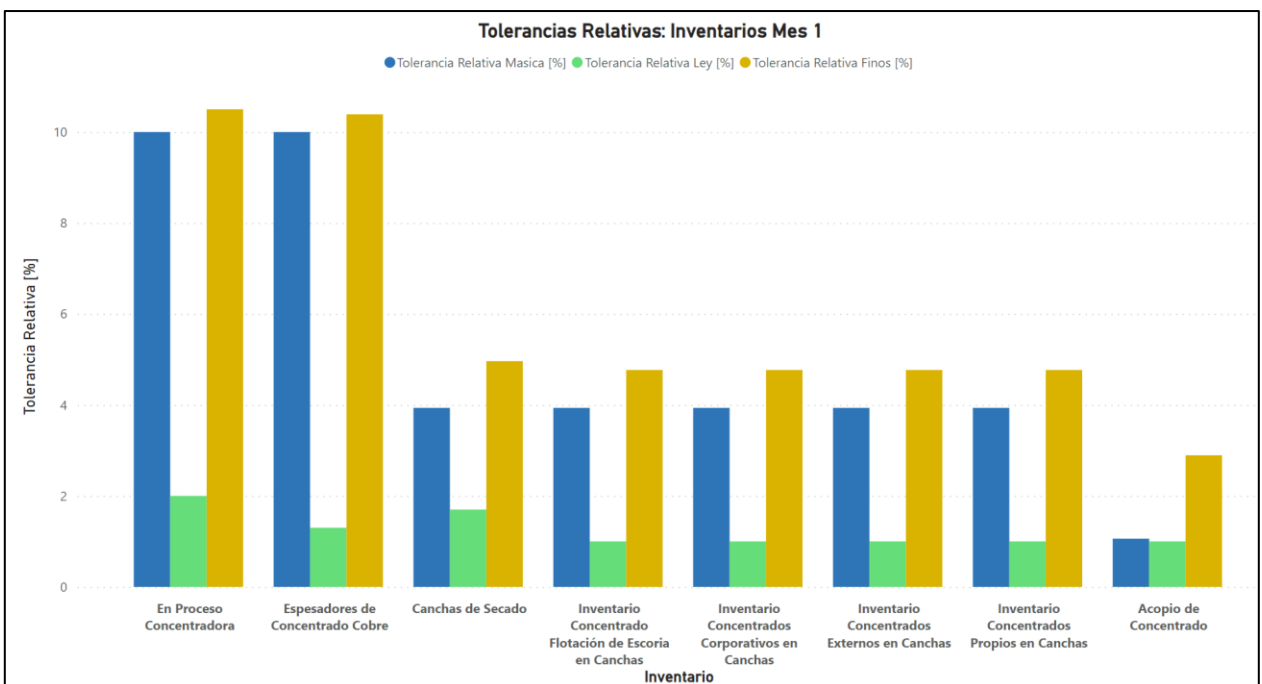
### 6.2 Tolerancias Relativas

Las tolerancias fueron calculadas de acuerdo con el método de cálculo de cada flujo o inventario presentado en la sección anterior.

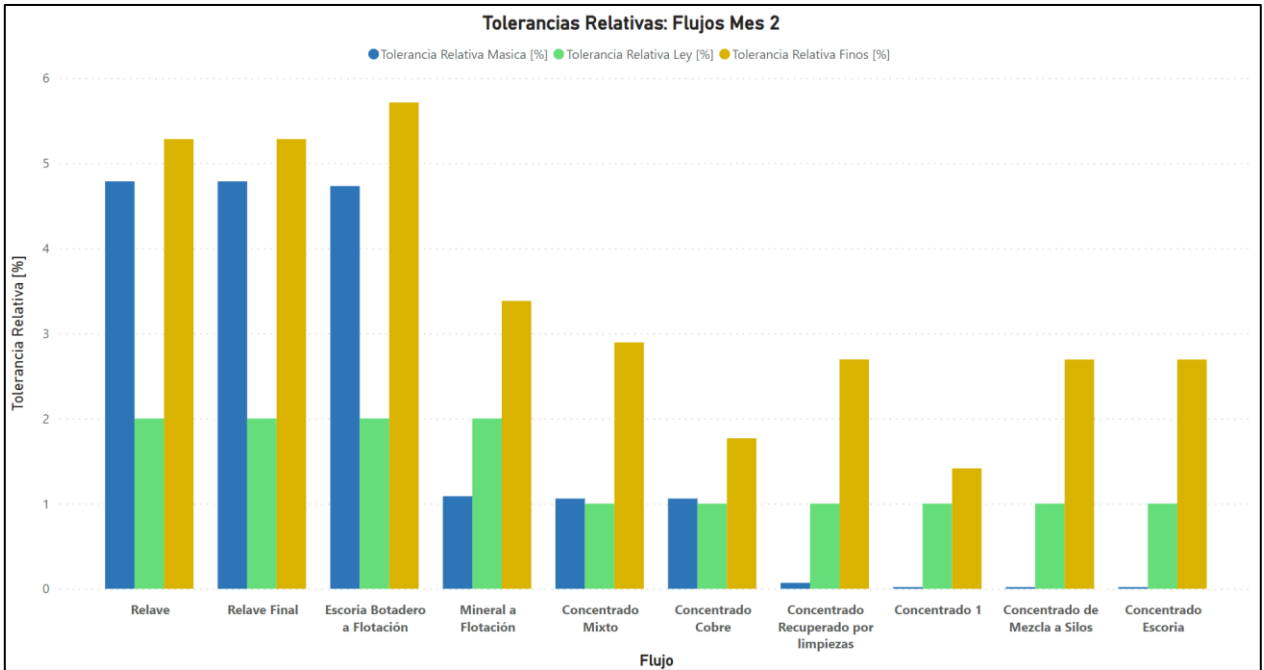
A continuación, se presentan gráficamente la magnitud de las tolerancias relativas para cada mes. Se optó por filtrar las tolerancias nulas para cada uno de los periodos, como también se separaron las tolerancias por flujos e inventarios:



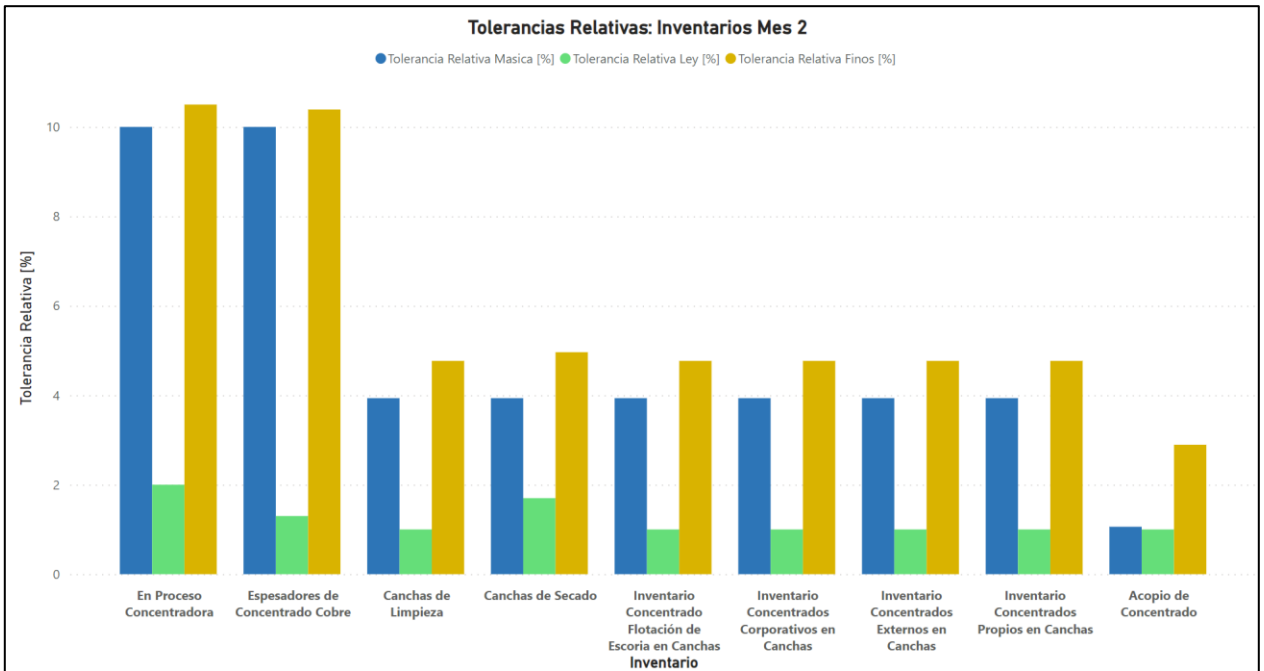
**Gráfico 1: Tolerancias Relativas de Flujos, Mes 1**



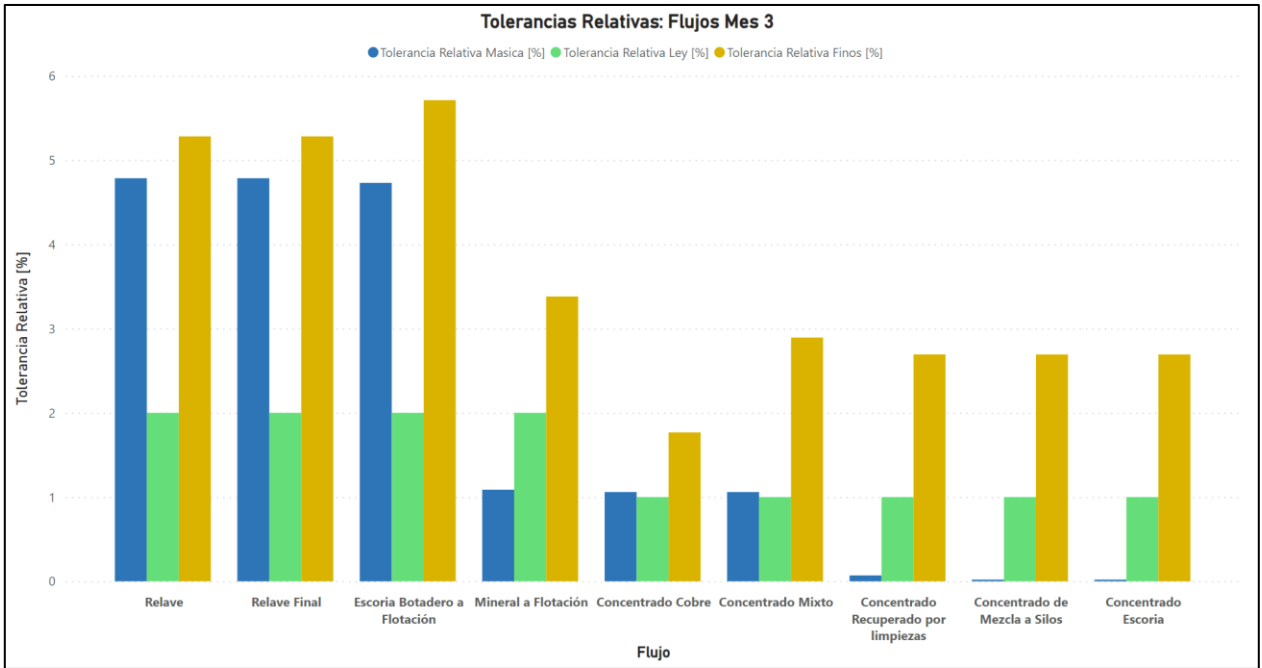
**Gráfico 2: Tolerancias Relativas de Inventarios, Mes 1**



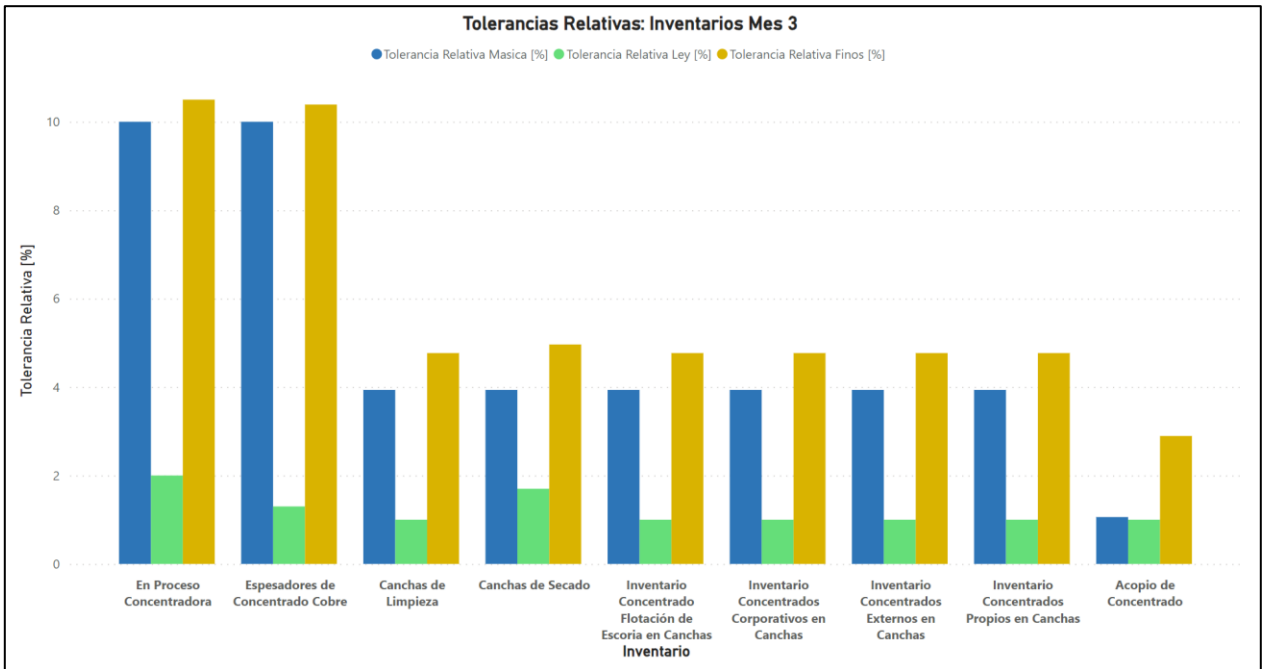
**Gráfico 3: Tolerancias Relativas de Flujos, Mes 2**



**Gráfico 4: Tolerancias Relativas de Inventarios, Mes 2**



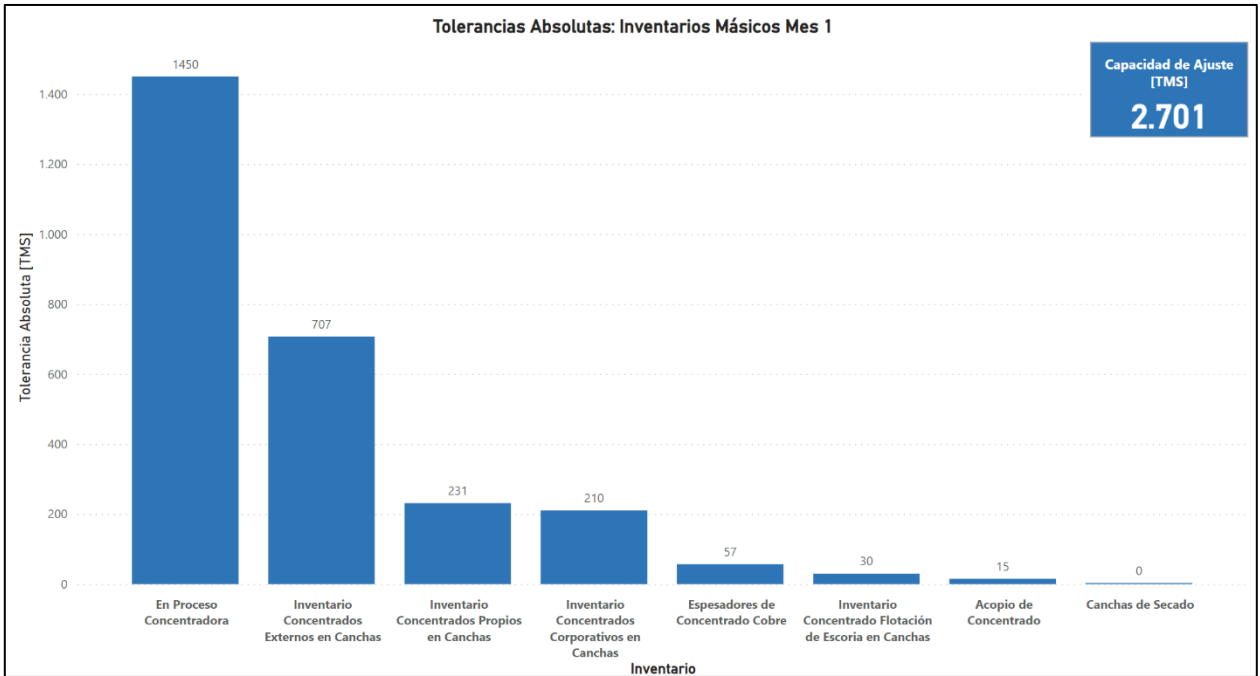
**Gráfico 5: Tolerancias Relativas de Flujos, Mes 3**



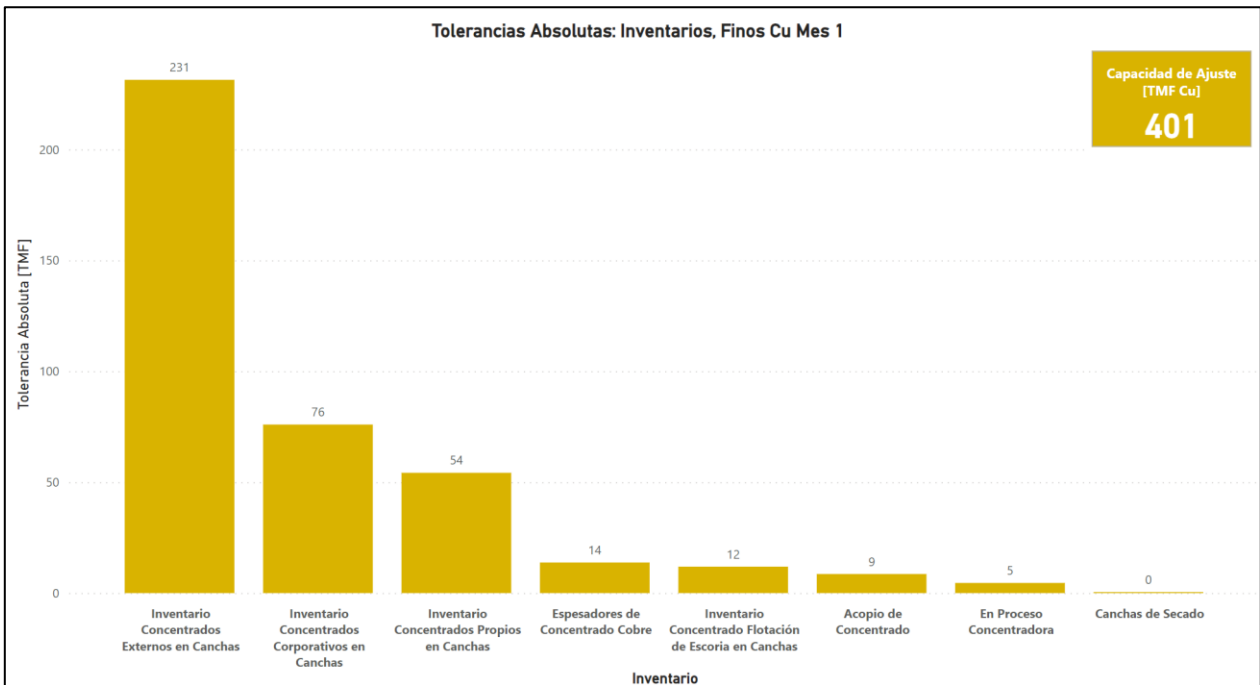
**Gráfico 6: Tolerancias Relativas de Inventarios, Mes 3**

### **6.3 Tolerancias Absolutas**

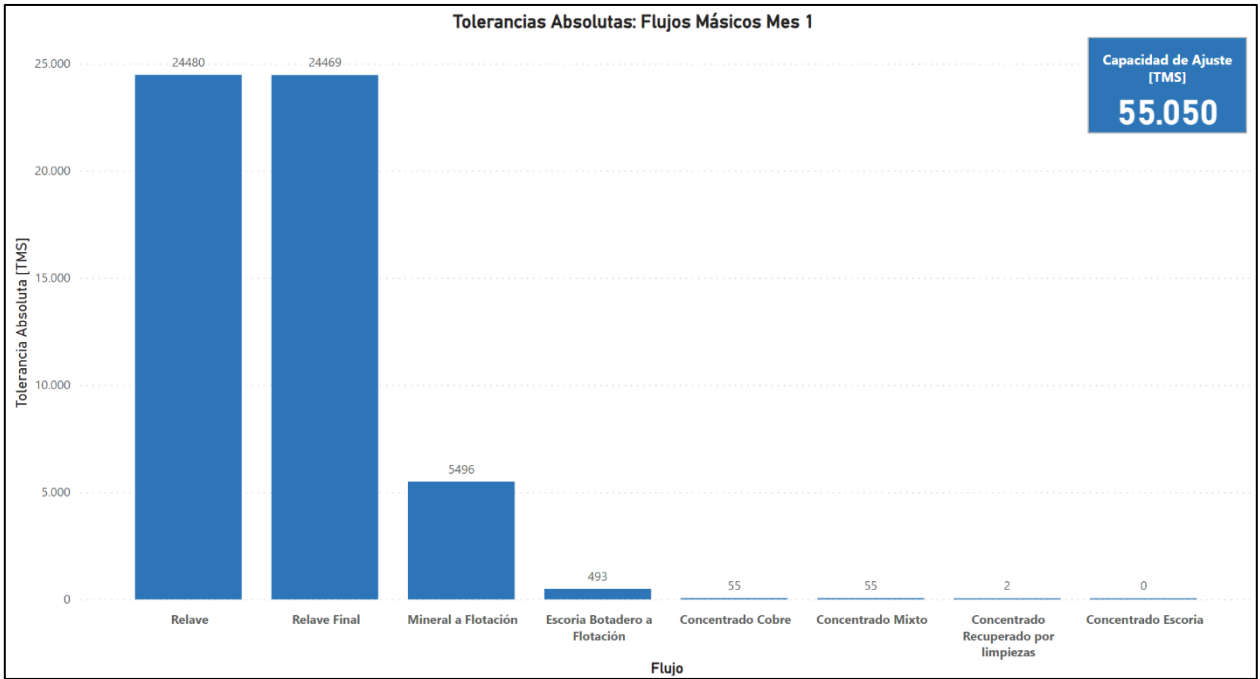
A continuación, se presentan las tolerancias absolutas asociadas a la masa y a los finos de cobre en cada flujo e inventario, para cada uno de los periodos analizados, junto a un indicativo de la capacidad de ajuste que se tiene para cada mes.



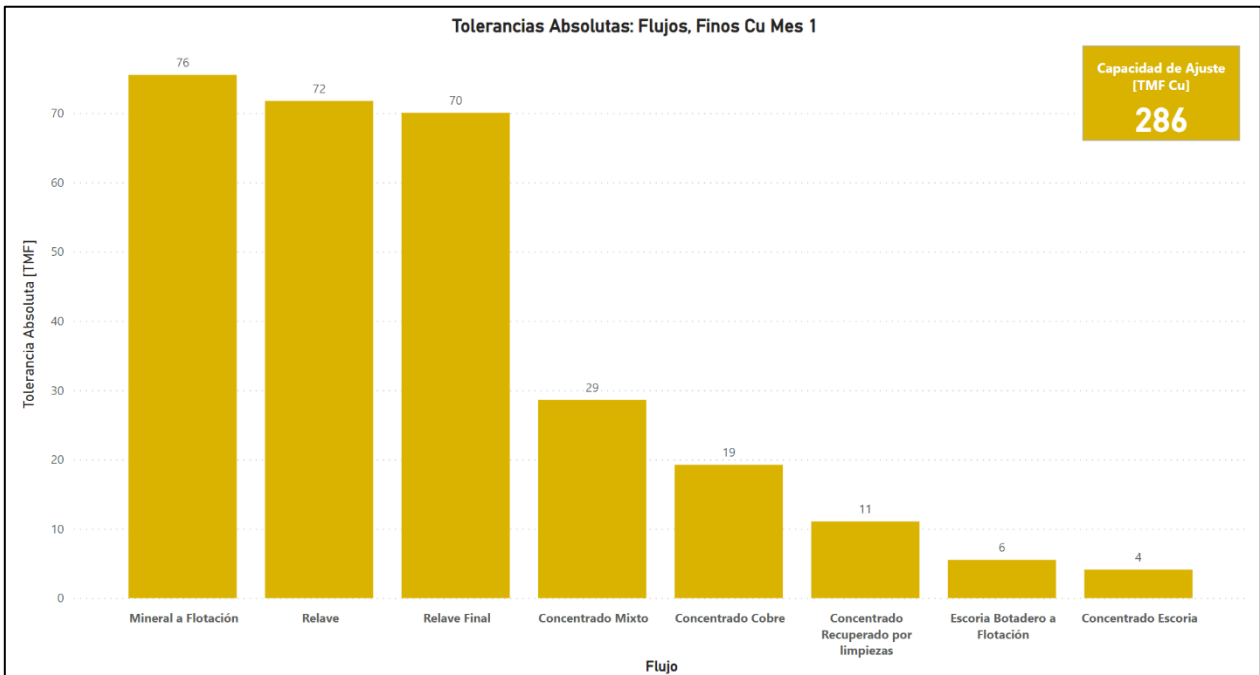
**Gráfico 7: Tolerancias Absolutas Másicas de Inventarios, Mes 1.**



**Gráfico 8: Tolerancias Absolutas de Finos de Cu en Inventarios, Mes 1.**

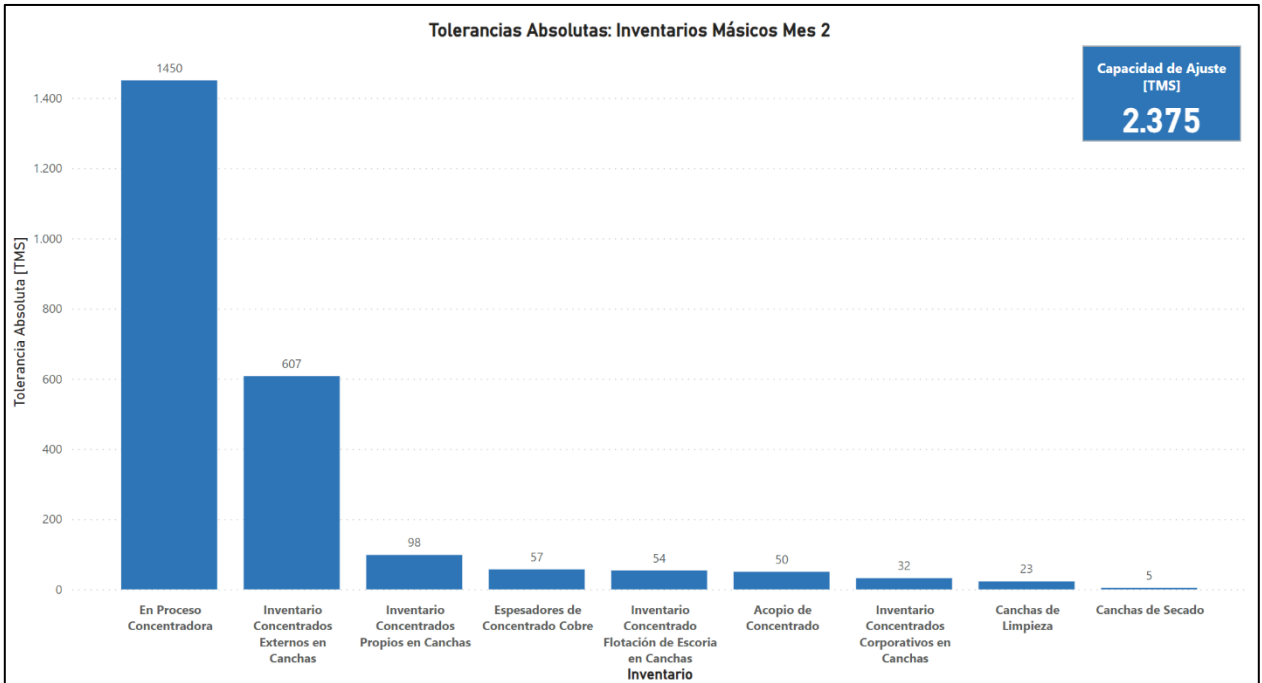


**Gráfico 9: Tolerancias Absolutas Másicas de Flujos, Mes 1.**

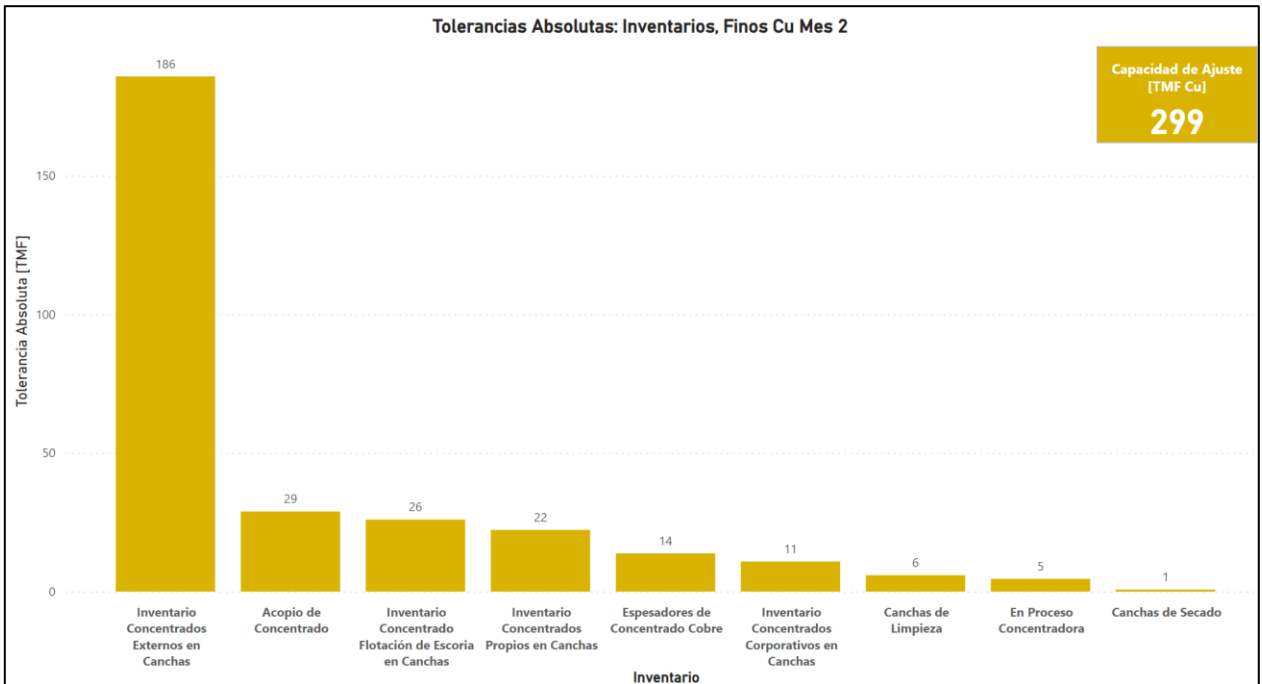


**Gráfico 10: Tolerancias Absolutas de Finos de Cu en Flujos, Mes 1.**

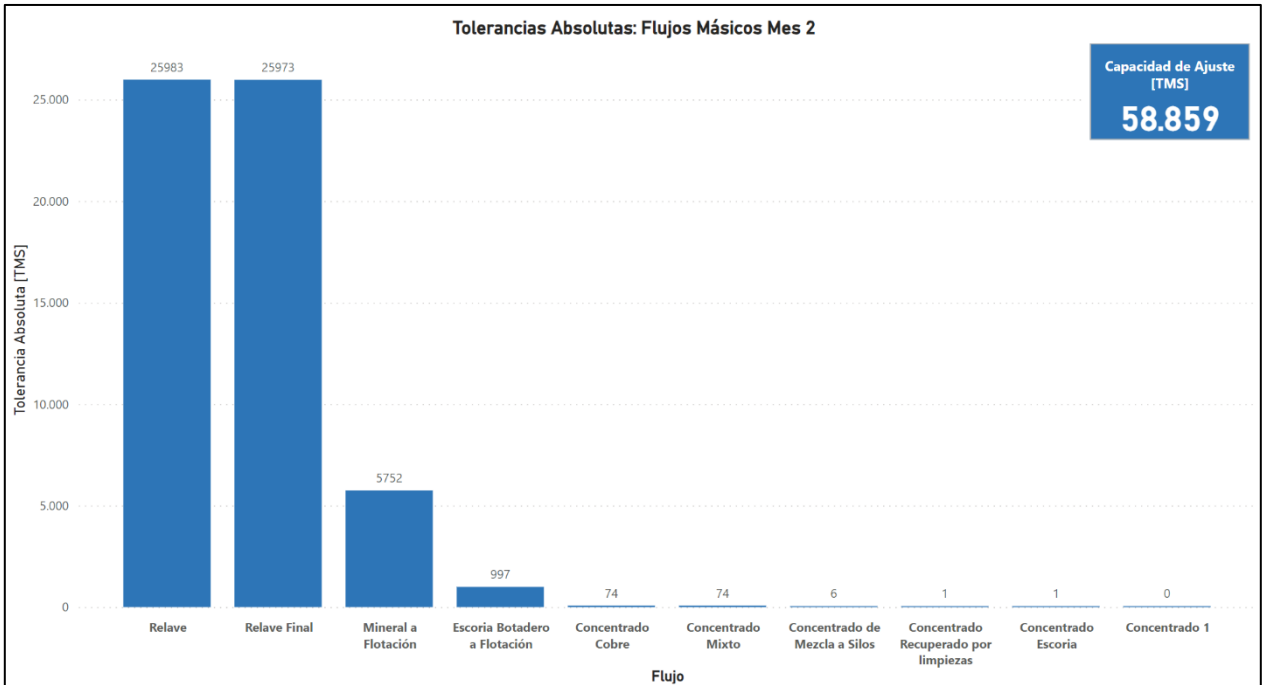




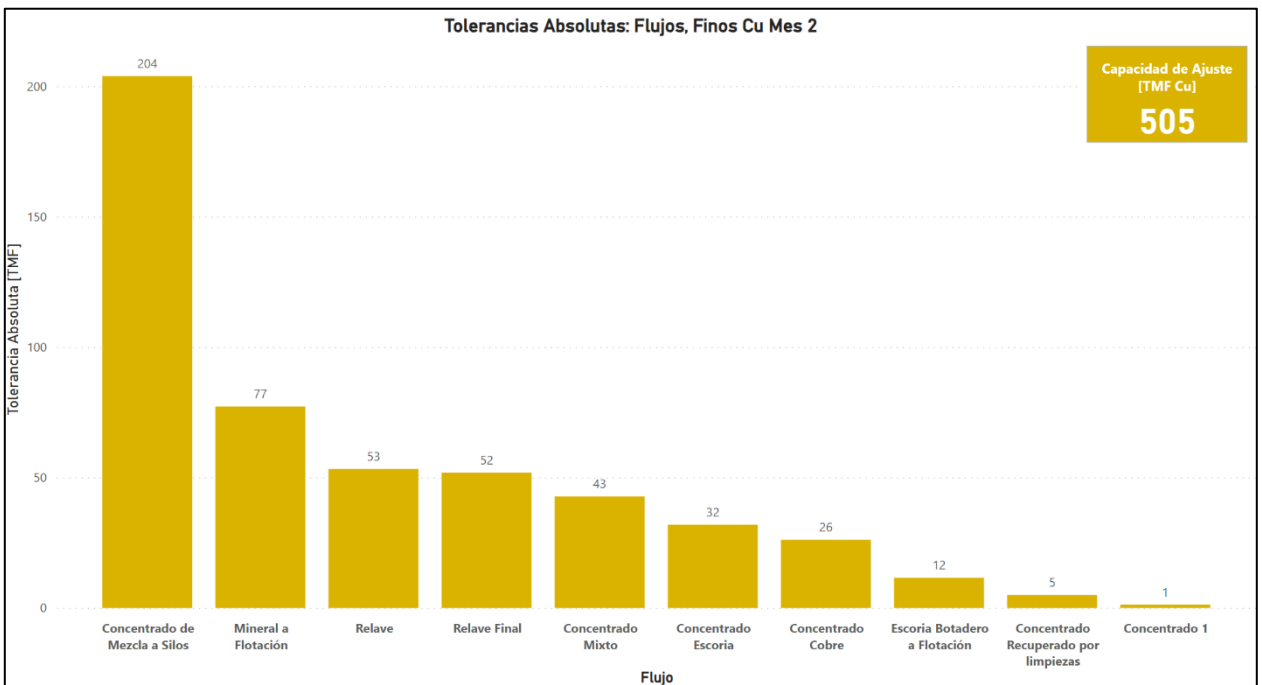
**Gráfico 11: Tolerancias Absolutas Másicas de Inventarios, Mes 2.**



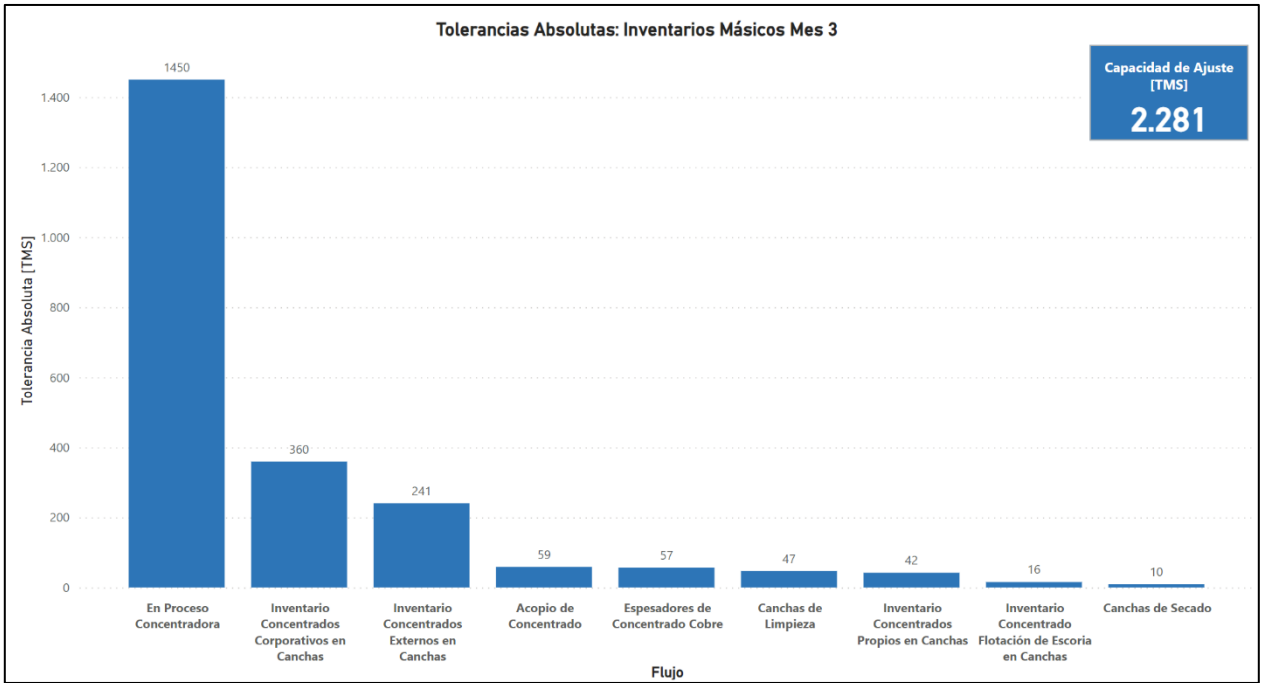
**Gráfico 12: Tolerancias Absolutas de Finos de Cu en Inventarios, Mes 2.**



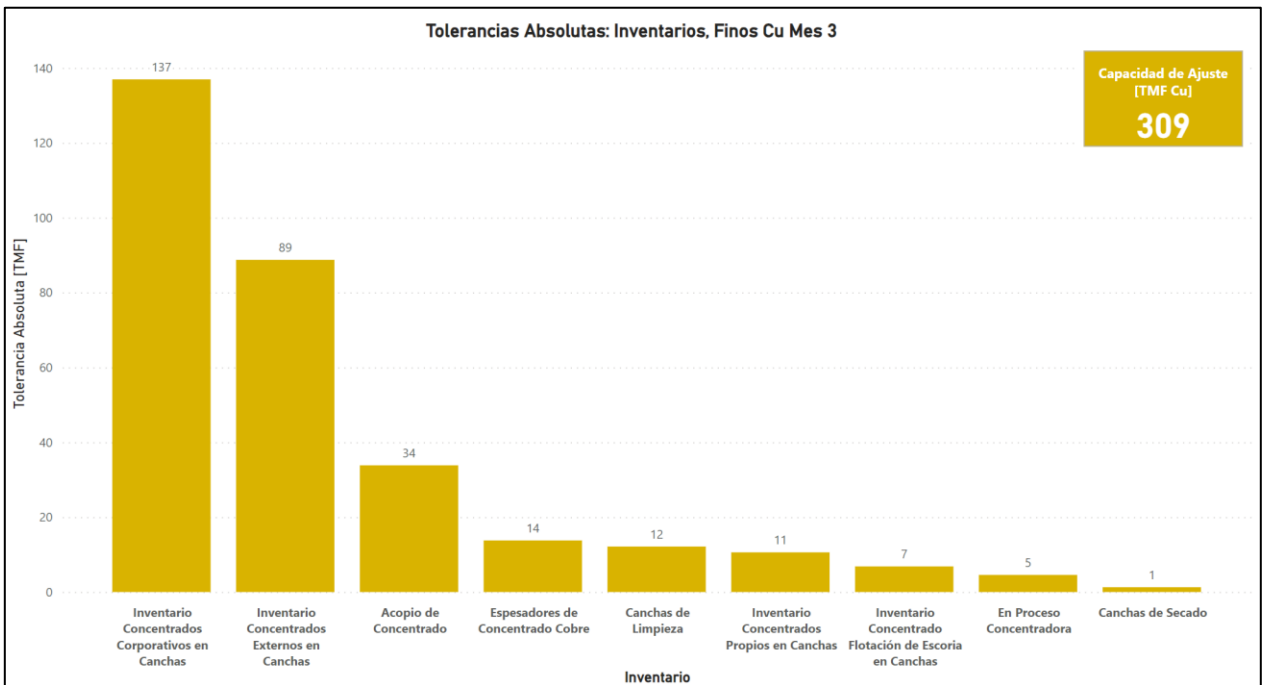
**Gráfico 13: Tolerancias Absolutas Másicas de Flujos, Mes 2.**



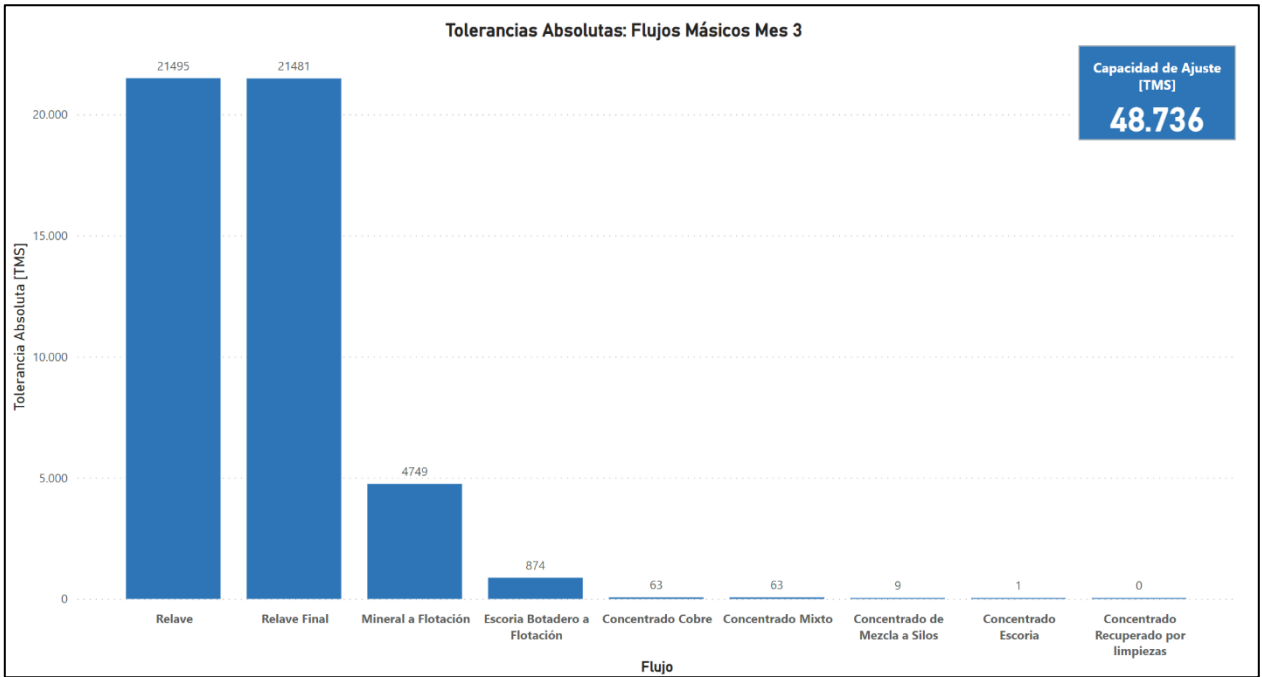
**Gráfico 14: Tolerancias Absolutas de Finos de Cu en Flujos, Mes 2.**



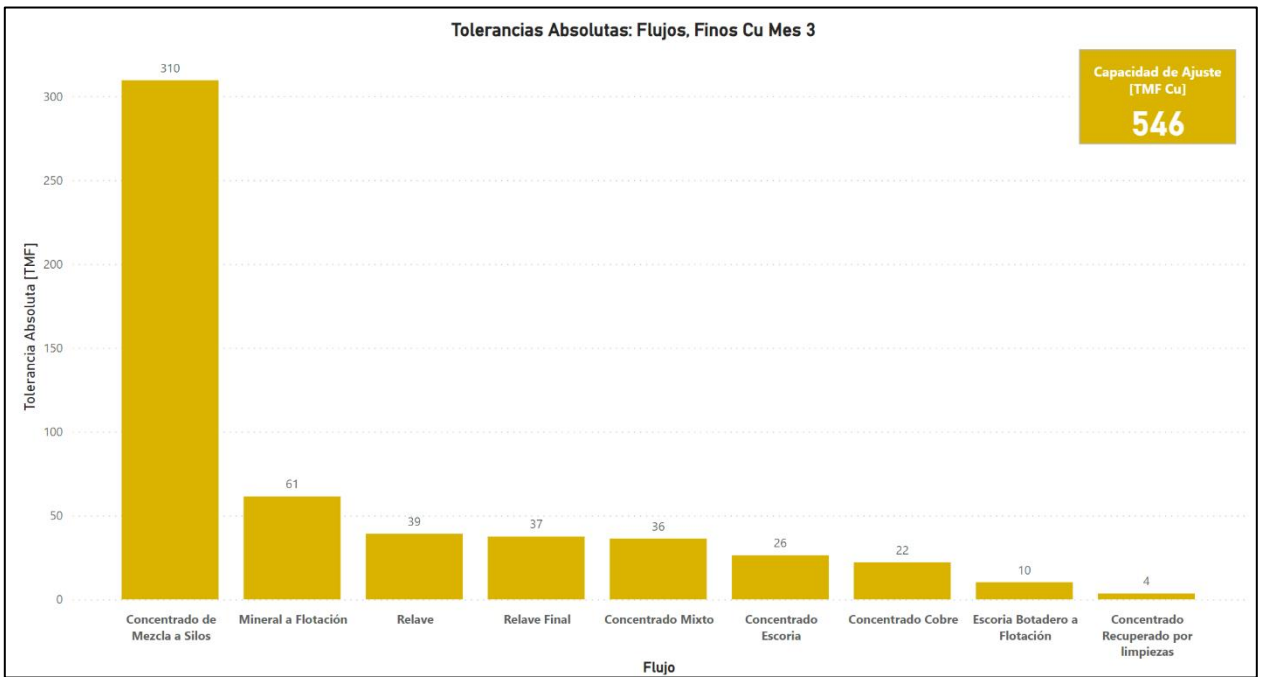
**Gráfico 15: Tolerancias Absolutas Másicas de Inventarios, Mes 3.**



**Gráfico 16: Tolerancias Absolutas de Finos de Cu en Inventarios, Mes 3.**



**Gráfico 17: Tolerancias Absolutas Másicas de Flujos, Mes 3.**



**Gráfico 18: Tolerancias Absolutas de Finos de Cu en Flujos, Mes 3.**

## 6.4 Riesgos

A partir de las tolerancias calculadas anteriormente se procedió a calcular el valor en riesgo asociado tanto a las recuperaciones como a los inventarios. Para esto se utilizaron los siguientes parámetros económicos:

**Tabla 5: Parámetros económicos.**

Parámetro	Unidad	Valor
Precio Cu	USD/lb	3,86
Tarifas TC/RC	USD/ton	90

El precio del cobre utilizado es la proyección de Cochilco para el 2024, mientras que las tarifas TC/RC son las fijadas por el Equipo de Compra de Fundiciones de China (CSPT) para el primer trimestre de 2023.

Los resultados obtenidos se presentan en las Tablas 7-12:

**Tabla 6: Valor en Riesgo, Mes 1**

Nodo	Mes 1			
	Inventario [TMS]	Finos en Inventarios [TMF]	Finos en Riesgo en Inventarios [TMF]	± Riesgo económico [USD]
1 Planta Concentradora	14.500	43	6	51.639
2 Planta Tratamiento de Relaves	9	1	0	632
3 Planta Moly	570	133	19	156.563
4 Almacenamiento Concentrado Moly	-	-	-	-
5 Planta de Filtrado	3.225	297	9	74.966
6 Almacenamiento de Concentrado	29.940	7.833	324	2.652.097
<b>Global</b>	46.448	8.308	325	<b>2.658.273</b>

Tabla 7: Valor en Riesgo, Mes 2.

Mes 2				
Nodo	Inventario [TMS]	Finos en Inventarios [TMF]	Finos en Riesgo en Inventarios [TMF]	± Riesgo económico [USD]
1 Planta Concentradora	14.500	43	6	51.639
2 Planta Tratamiento de Relaves	115	15	1	7.527
3 Planta Moly	570	133	19	156.563
4 Almacenamiento Concentrado Moly	-	-	-	-
5 Planta de Filtrado	5.289	1.121	32	259.457
6 Almacenamiento de Concentrado	20.092	5.136	245	2.009.669
<b>Global</b>	40.566	6.448	248	<b>2.033.058</b>

Tabla 8: Valor en Riesgo, Mes 3.

Mes 3				
Nodo	Inventario [TMS]	Finos en Inventarios [TMF]	Finos en Riesgo en Inventarios [TMF]	± Riesgo económico [USD]
1 Planta Concentradora	14.500	43	6	51.635
2 Planta Tratamiento de Relaves	250	26	2	13.397
3 Planta Moly	570	133	19	156.563
4 Almacenamiento Concentrado Moly	-	-	-	-
5 Planta de Filtrado	6.739	1.424	39	322.080
6 Almacenamiento de Concentrado	16.726	5.098	212	1.737.533
<b>Global</b>	38.786	6.724	217	<b>1.774.856</b>

**Tabla 9: Recuperación en Riesgo, Mes 1.**

Mes 1		
Nodo	Recuperación [%]	± Recuperación en riesgo [%]
1 Planta Concentradora	41,7	1,4
2 Planta Tratamiento de Relaves	5,3	0,4
3 Planta Moly	100,0	3,2
<b>Global</b>	62,2	<b>1,5</b>

**Tabla 10: Recuperación en Riesgo, Mes 2.**

Mes 2		
Nodo	Recuperación [%]	± Recuperación en riesgo [%]
1 Planta Concentradora	59,4	2,0
2 Planta Tratamiento de Relaves	6,7	0,5
3 Planta Moly	100,0	3,1
<b>Global</b>	88,5	<b>1,1</b>

**Tabla 11: Recuperación en Riesgo, Mes 3.**

Mes 3		
Nodo	Recuperación [%]	± Recuperación en riesgo [%]
1 Planta Concentradora	62,9	2,1
2 Planta Tratamiento de Relaves	9,6	0,7
3 Planta Moly	100,0	3,1
<b>Global</b>	93,9	<b>0,5</b>

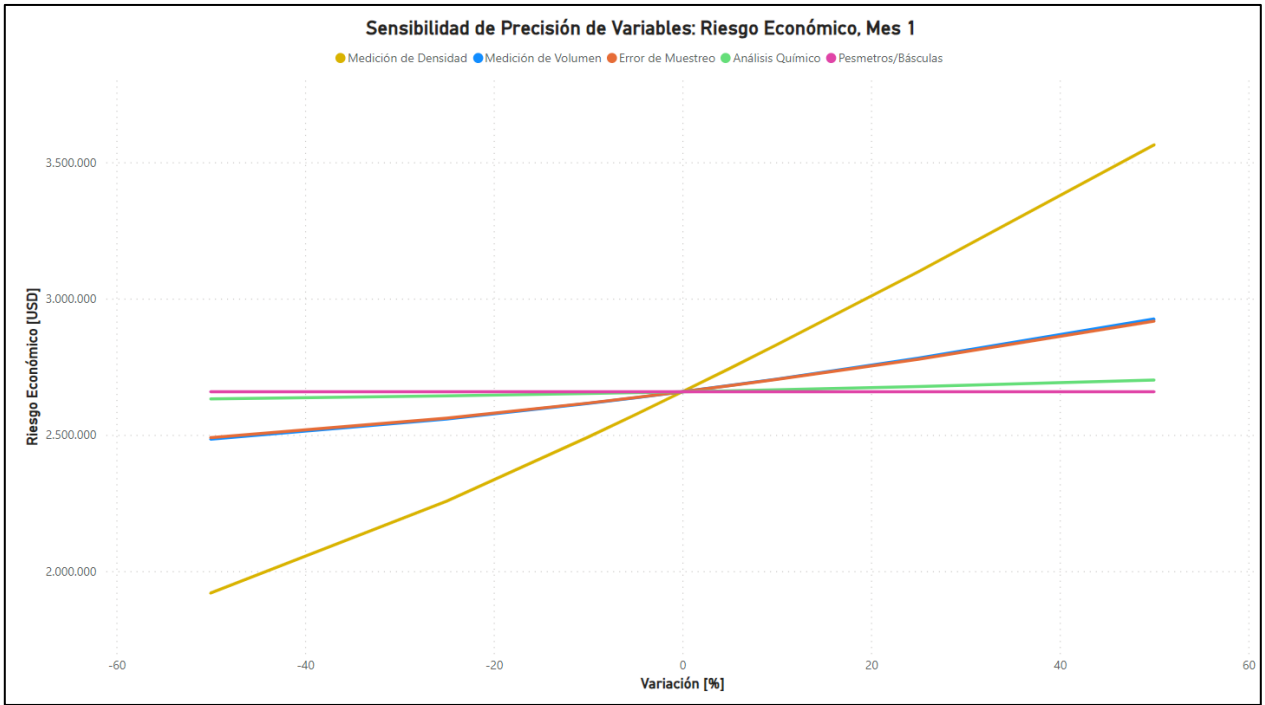
## 6.5 Sensibilidad de variables

A continuación, se realizó un análisis de sensibilidad sobre las tolerancias, donde se evaluaron cuales errores impactaban de manera significativa al resultado.

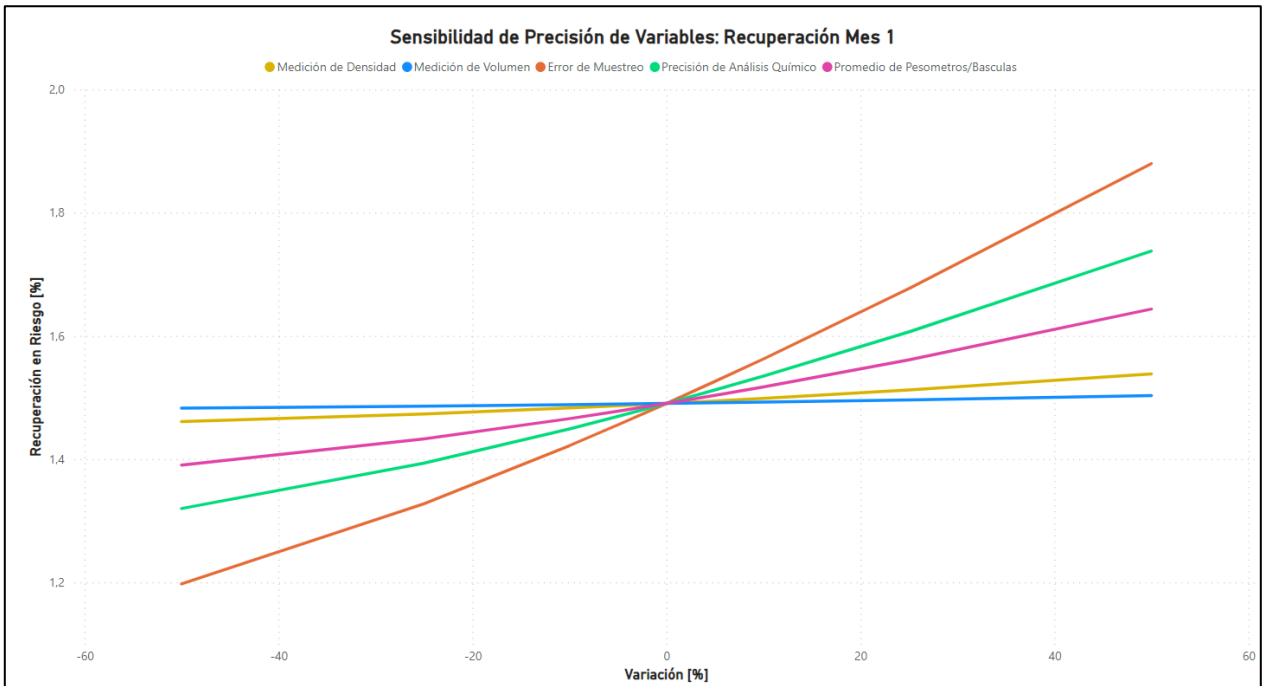
Los resultados obtenidos en esta etapa se presentan de 2 maneras:

- Primeramente, se presentan los gráficos donde en el eje de las abscisas se tiene la variación de cada error asociado a cada uno de los parámetros (Medición de densidad, volumen, error de muestreo, análisis químico y precisión de pesómetros y básculas). En el eje vertical se tiene los ingresos en riesgo en inventarios que se obtiene al aplicar esta variación porcentual. Es importante resaltar que un aumento en la precisión del proceso, o la disminución del error asociado, se interpreta como una variación negativa en el gráfico.
- Luego se evalúa como la variación de 1 punto porcentual impacta al resultado. Obtenido, y se incorporan las variables verticalmente a un gráfico de embudo (Tornado Chart), en orden de mayor a menor impacto. Este gráfico se realizó para el impacto al promedio del periodo en estudio.
- Finalmente se incluye una tabla donde se elimina por completamente un error, y se evalúa la diferencia del riesgo con el valor original, para así estimar cuanto cada incertidumbre aporta al riesgo total.

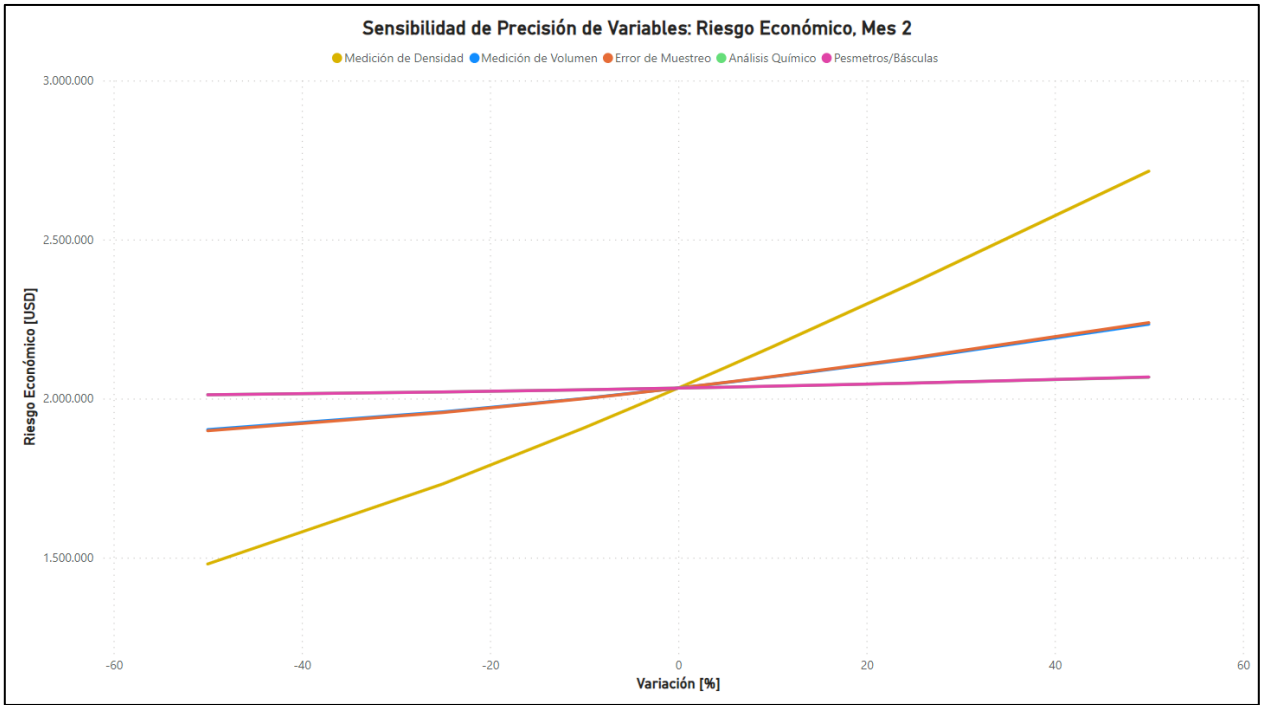




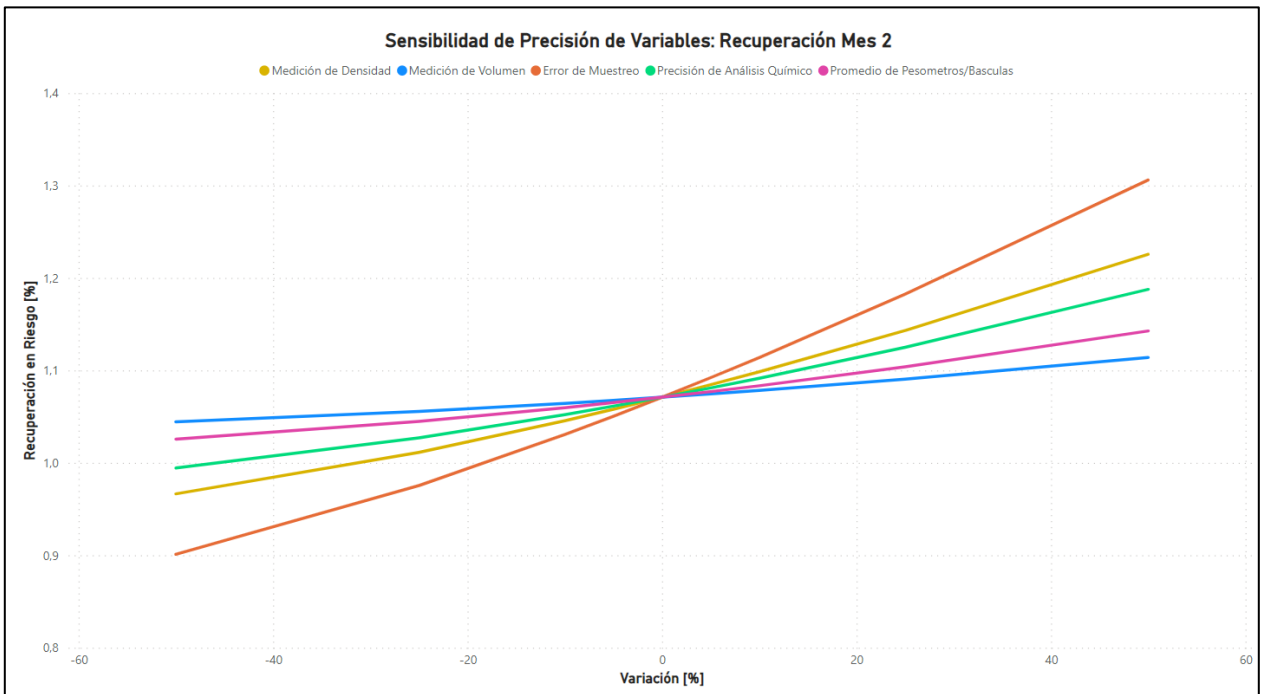
**Gráfico 19: Sensibilidad respecto al riesgo económico, Mes 1**



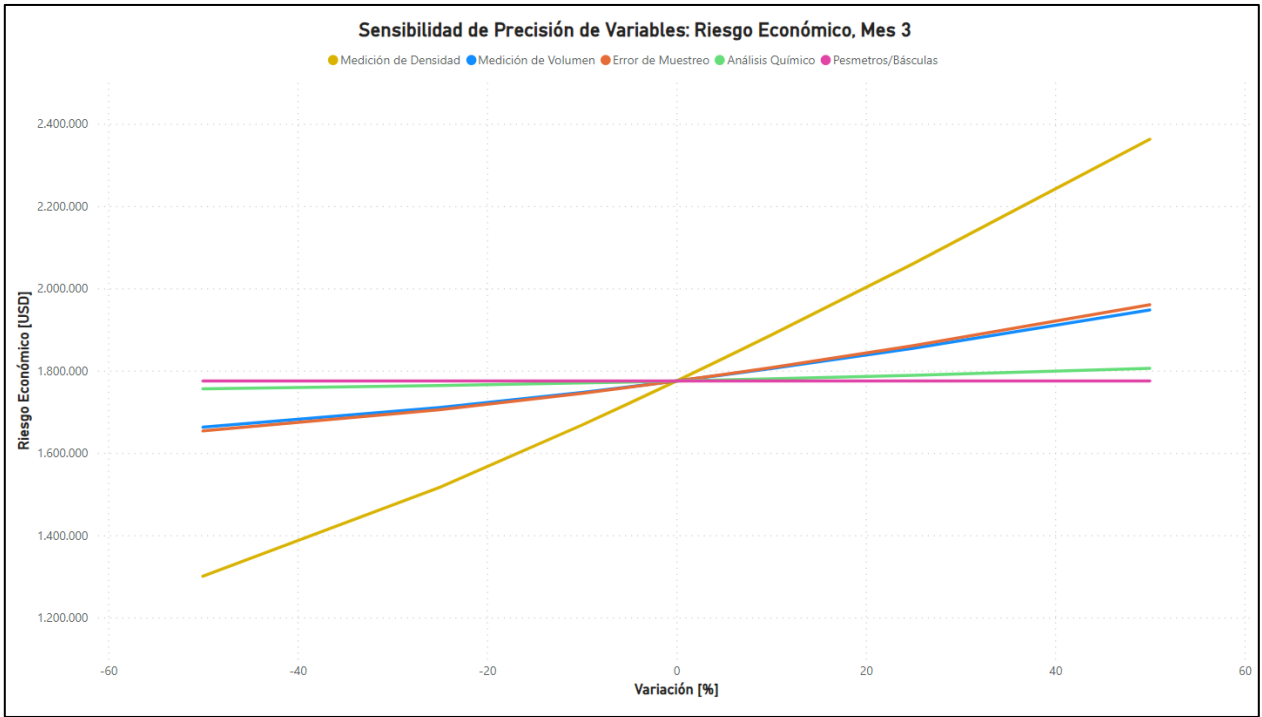
**Gráfico 20: Sensibilidad respecto a la recuperación en riesgo, Mes 1**



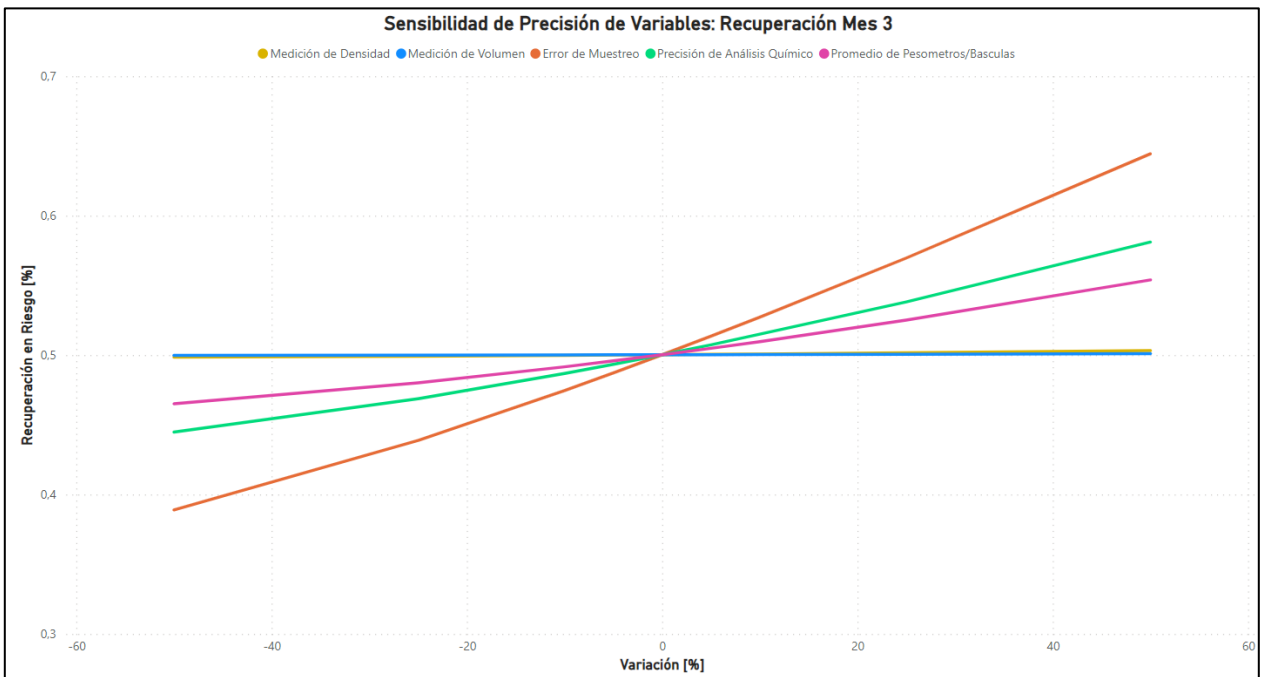
**Gráfico 21: Sensibilidad respecto al riesgo económico, Mes 2**



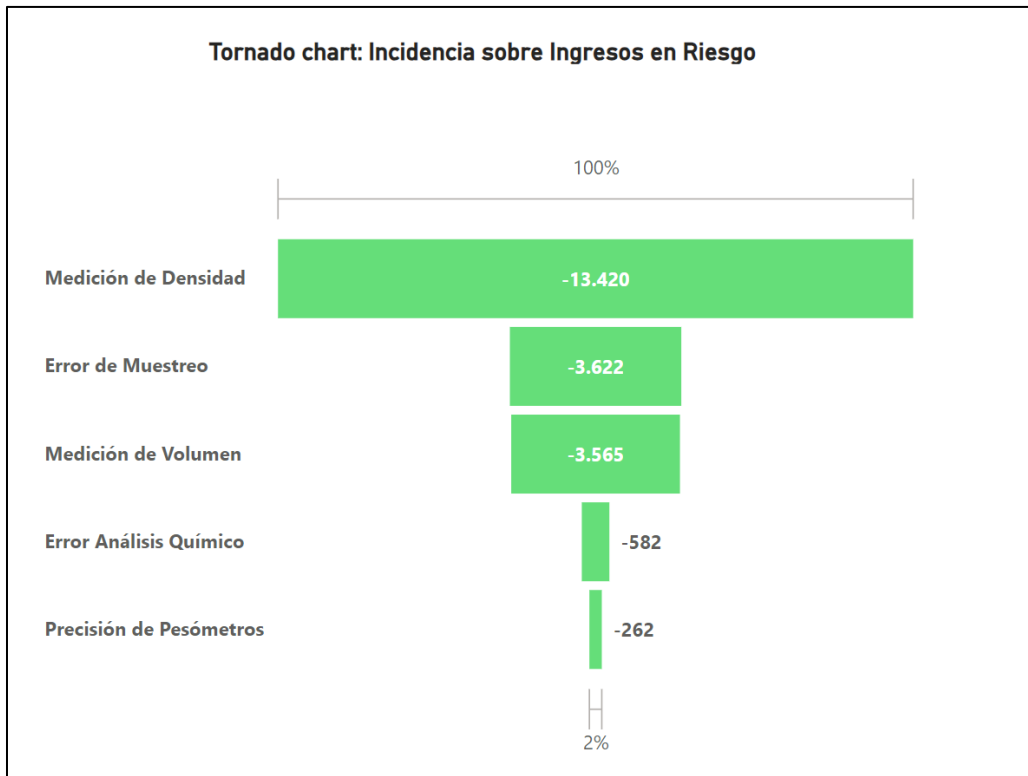
**Gráfico 22: Sensibilidad respecto a la recuperación en riesgo, Mes 2**



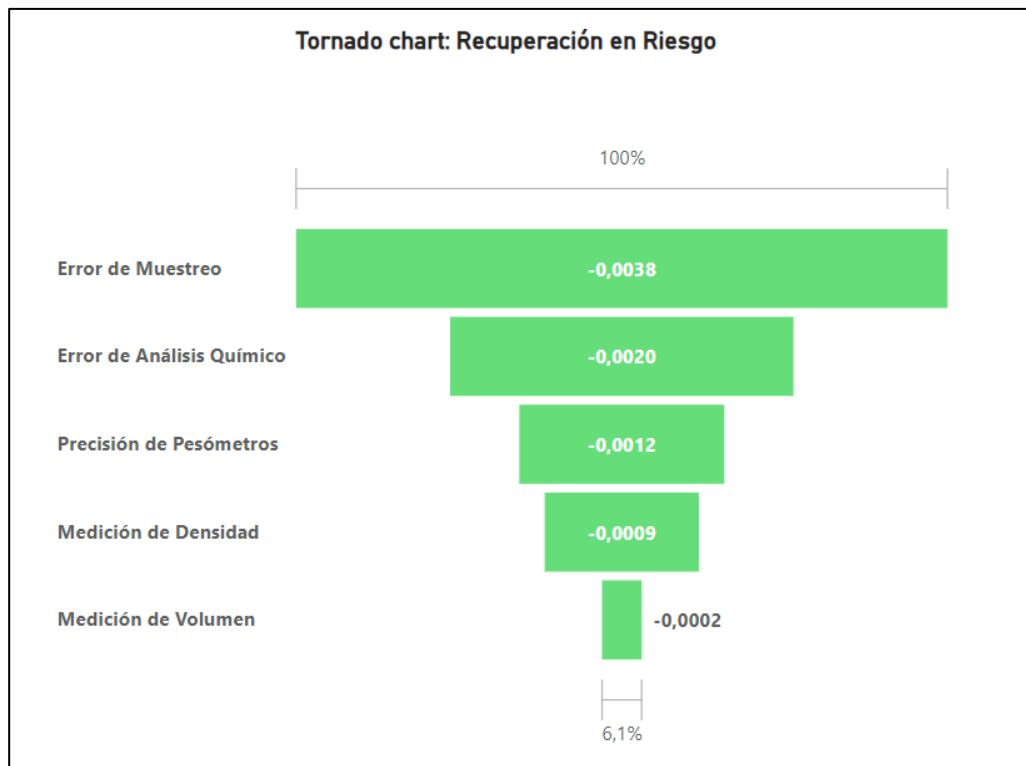
**Gráfico 23: Sensibilidad respecto al riesgo económico, Mes 3**



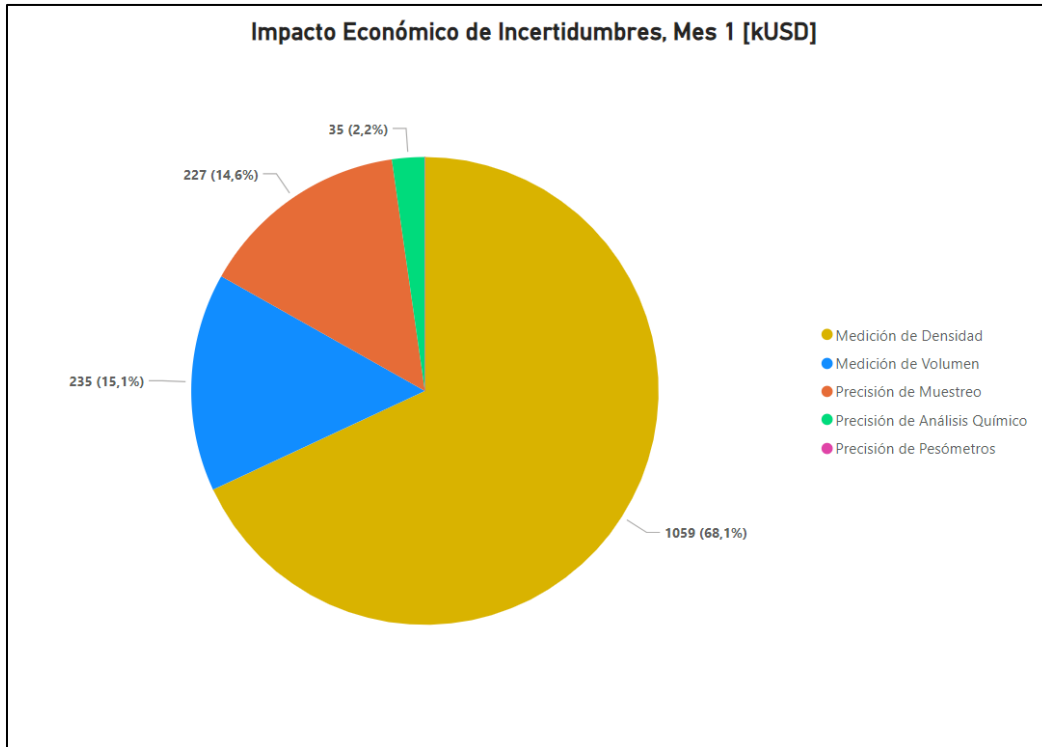
**Gráfico 24: Sensibilidad respecto a la recuperación en riesgo, Mes 3**



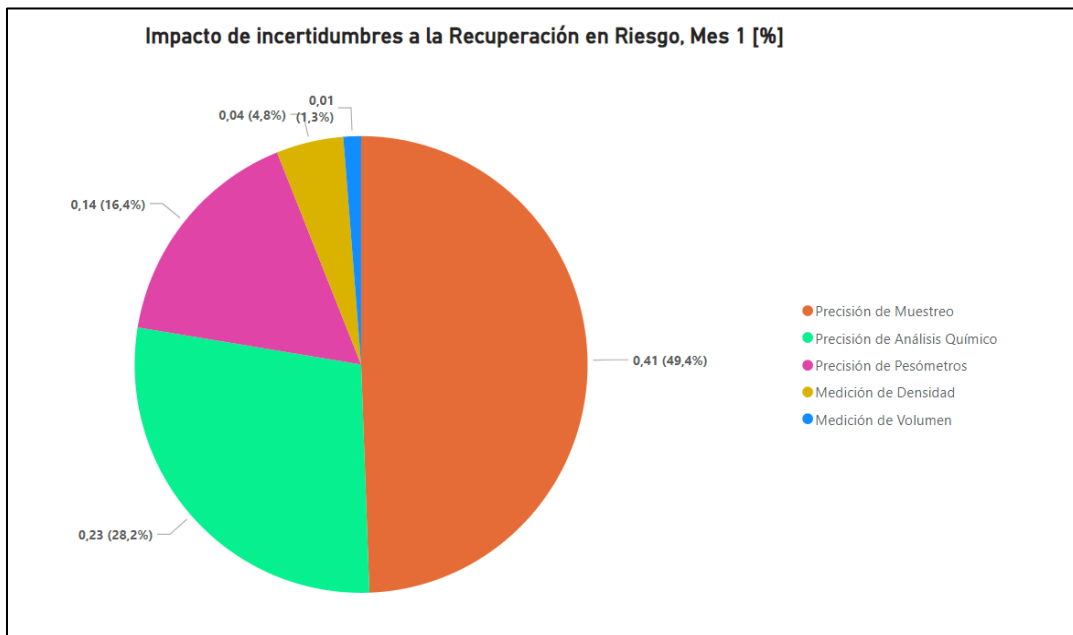
**Gráfico 25: Tornado Chart, incidencia sobre ingresos en riesgo.**



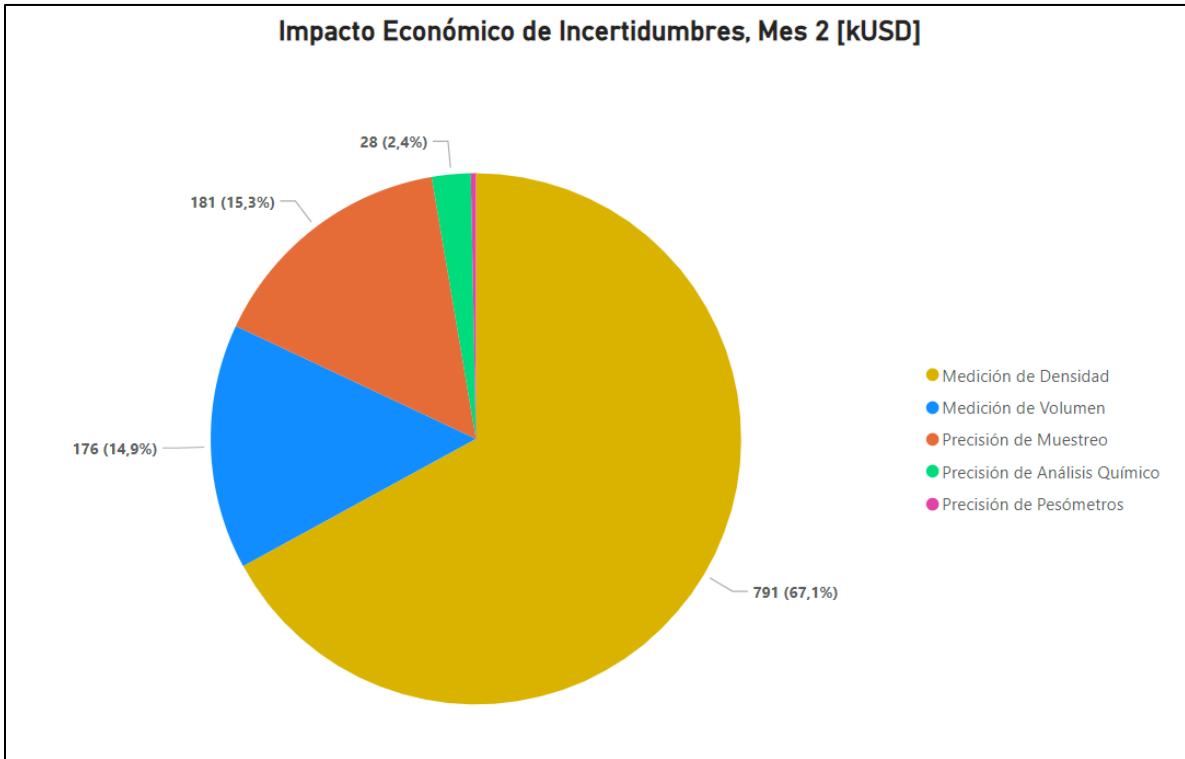
**Gráfico 26: Tornado Chart, incidencia sobre recuperación en riesgo.**



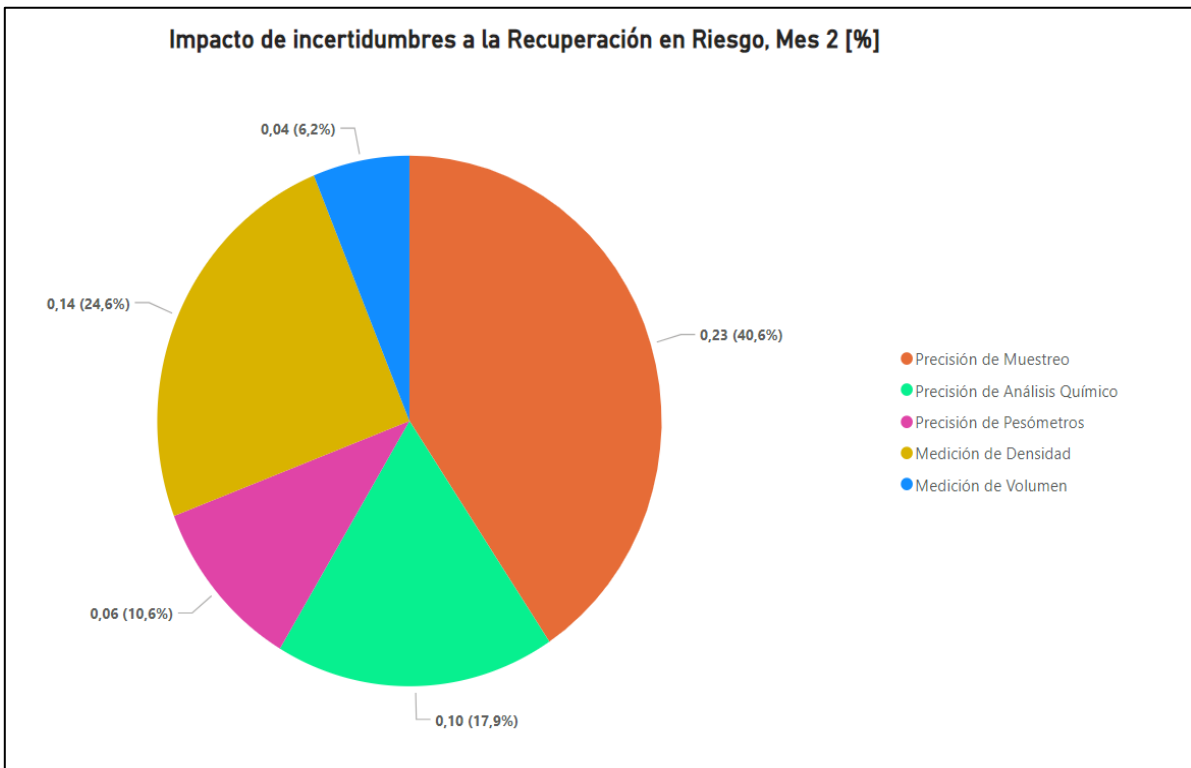
**Gráfico 28: Impacto Económico de Incertidumbres, Mes 1.**



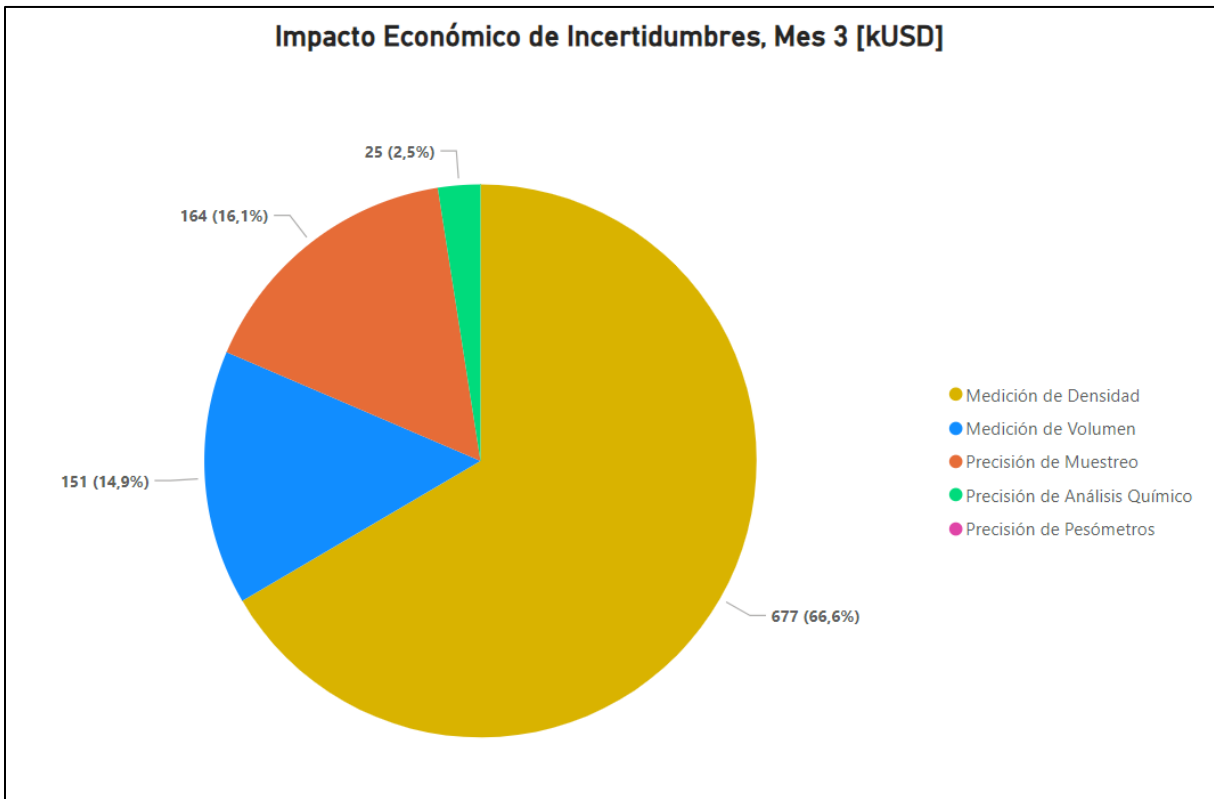
**Gráfico 27: Impacto de incertidumbres a la recuperación en riesgo, Mes 1.**



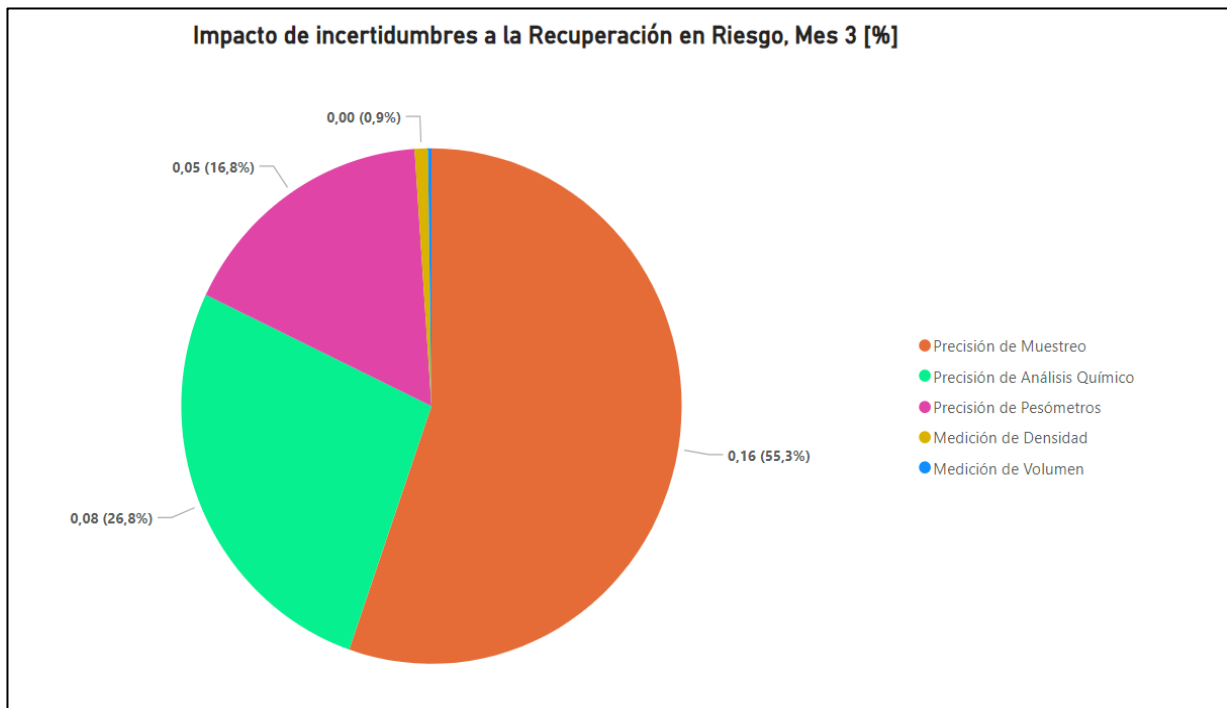
**Gráfico 29: Impacto Económico de Incertidumbres, Mes 2.**



**Gráfico 3030: Impacto de incertidumbres a la recuperación en riesgo, Mes 2.**



**Gráfico 311: Impacto Económico de Incertidumbres, Mes 3.**



**Gráfico 32: Impacto de incertidumbres a la recuperación en riesgo, Mes 3.**

## 7. Análisis de Resultados

### 7.1 Tolerancias

A modo general, cabe destacar que la tolerancia relativa asociada a los finos de cobre supera a la asociada a la masa y a la ley de cobre para todos los componentes del modelo de balances. Esto se debe a que su valor corresponde al producto entre estos 2 parámetros por lo que, al emplear la fórmula de propagación de errores, su error siempre debe ser igual o mayor a los errores de cada uno de los parámetros.

A partir de los resultados obtenidos, existe una tendencia clara en la magnitud de las tolerancias, donde para el caso de los flujos, las mayores tolerancias relativas y absolutas, tanto las asociadas a la masa como a la ley de cobre y finos, se encuentran asociadas a los flujos de **Relave y Relave Final, Escorias de Botadero a Flotación y Mineral a Flotación**.

Para el caso de **Mineral a Flotación y Escorias de Botadero a Flotación** la incertidumbre asociada se debe a las calibraciones de los 5 pesómetros involucrados, las cuales varían desde el 0,39% hasta 4,73%, como se observa en la Tabla 4.

Para el caso del **Relave** esta tendencia era esperable, debido a que se trata de un flujo calculado y su cálculo depende de distintos factores, siendo influenciado fuertemente por la alimentación a la planta (y por ende, **Mineral a Flotación y Escorias de Botadero a Flotación**). Los factores involucrados en este cálculo aportan a que la tolerancia relativa de este flujo sea alta. El valor del flujo de **Relave Final** depende directamente del flujo de **Relave**, y por ende sus tolerancias son prácticamente idénticas. Para los mismos flujos cabe destacar que la mayor tolerancia está asociada a la ley de cobre y consecuentemente al tonelaje de finos, debido a que no se realiza un análisis químico directo.

Se destaca que la mayor capacidad de ajuste, es decir, los flujos que pueden sufrir mayores variaciones en un balance metalúrgico corresponden a estos, debido a su valor relativamente alto, y las incertidumbres que se encuentran asociadas a la determinación de su magnitud.

Para el caso de los inventarios, en los 3 periodos analizados los que presentan mayor incertidumbre corresponden al inventario **En Proceso Concentradora y Espesadores de Concentrado Cobre**.

Para el caso de ambos inventarios, se le asocia una tolerancia de masa por criterio experto. Lo anterior se debe a que ambos inventarios tienen un valor másico fijo para todos los meses, de 14.500 TMS y 470 TMS respectivamente, lo cual implica una magnitud alta de incertidumbre al no disponer de un método de medición o



cálculo. Esta tolerancia relativa del 10% implica una tolerancia absoluta para el inventario **En Proceso Concentradora** de 1.400 TMS, la cual es la más alta en todos los meses.

Para la tolerancia relativa de ley de cobre, para el inventario **En Proceso Concentradora**, el análisis es el mismo que para la tolerancia de masas, debido a que se le impone una ley del 0,3%. Para el caso del inventario **Espesadores de Concentrado Cobre**, la ley asociada es obtenida a partir de muestreo por volumetría de la cola del concentrado de molibdeno, por lo que la tolerancia es menor. Si bien la tolerancia másica asociada al inventario **En Proceso Concentradora** es alta, su tolerancia absoluta de finos es relativamente baja, debido a la baja ley asociada. Los inventarios con la mayor tolerancia absoluta de finos asociada corresponden a los que se encuentran en el **Nodo 6 Almacenamiento de Concentrado**, correspondiente a los concentrados en cancha, cuyos valores se obtienen a partir de la medición de volumen por topografía y la medición de densidad por picnometría. Este resultado es de esperarse debido a que los contenidos de cobre en concentrado son altos y son inventarios relativamente grandes.

Las capacidades de ajuste, o la suma de las tolerancias absolutas, son muy superiores para el caso de los flujos comparado al de los inventarios. Esto se debe a que el valor que toman los flujos son un total acumulado del mes, mientras que el valor de los inventarios es lo que se tiene en el momento instantáneo de la realización del balance metalúrgico. Esto implica a que existe una holgura más grande para ajustar los flujos, pero no necesariamente porque estos tengan una mayor incertidumbre.

## 7.2 Riesgos

### 7.2.1 Riesgo Económico

El riesgo económico asociado a los inventarios para los meses en estudio se puede apreciar en las tablas 6, 7 y 8, con valores de 325, 248 y 217 toneladas de cobre lo cual se ve traducido en términos monetarios por 2,65; 2,03 y 1,77 MUSD respectivamente.

El periodo de estudio tiene un orden cronológico ascendiente, y aun así se puede ver una disminución del riesgo en el tiempo. Esto es un reflejo de la naturaleza del balance metalúrgico para los inventarios, dado que corresponden al estado en el que se encuentran al momento de realizar el balance, y no necesariamente se tienen riesgos acumulativos. La disminución de este riesgo en el tiempo no se da debido a mejores mediciones, y si por el hecho de que se hayan consumido los inventarios, acción que implica ejercer los riesgos.

Respecto a los resultados obtenidos para los riesgos, estos se ven principalmente traducidos en la valoración de los inventarios del nodo de **Almacenamiento de**

**Concentrado**, lo cual es de esperarse debido a que es el nodo que acumula los inventarios del principal producto de la planta.

El valor de los inventarios de esta planta es obtenido mediante las mediciones de densidad y el volumen obtenido por topografía, por lo tanto, el riesgo asociado a directamente asociado a la incertidumbre asociada al proceso de medición de estos parámetros.

En la tabla 11 se indican los valores asociados a las ventas de concentrados de la planta, para que se pueda apreciar como varía la magnitud de los riesgos asociados al proceso. Los resultados obtenidos poseen una alta variación, donde en el mes 1 los riesgos asociados al inventario corresponden a un 7,6% de las ventas del mismo mes, en el mes 2 el 16,4% y en el mes 3 el 9,9%. Se observa una tendencia a disminuir el porcentaje a medida que aumentan las ventas, lo cual tiene un sentido lógico debido a 3 razones principales:

- Existe un costo asociado al manejo de inventarios, que crece proporcionalmente al tamaño de estos. Acumular productos en inventarios no es deseable si el mismo producto se puede vender en el mismo periodo, tanto por el costo anteriormente mencionado como por la depreciación del dinero en el tiempo. Caso no exista acumulación del inventario, y las ventas aumenten, la incidencia del valor de este sobre el porcentaje total naturalmente baja.
- Un aumento en las ventas comúnmente también se encuentra asociado a la venta de inventarios, por lo que su magnitud baja y por el mismo motivo del punto anterior, su incidencia sobre el porcentaje del total también se ve reducida.
- Sumado al punto anterior, la venta de inventarios implica ejercer el riesgo asociado al mismo, por lo que el valor absoluto del riesgo también baja.

**Tabla 12: Magnitud del riesgo económico.**

Mes	Concentrado a ventas [TMF Cu]	± Riesgo en Inventarios [TMF Cu]	Ventas de Concentrado [USD]	± Riesgo en Inventarios [USD]	% del total
1	4.294	325	35.161.672	2.658.273	7,6
2	1.513	248	12.386.219	2.033.058	16,4
3	2.187	217	17.909.731	1.774.856	9,9

Por un lado, se debe considerar que la mina posee otras líneas de procesamiento, y el concentrado no es el único producto comercial, por lo que el porcentaje del total de ventas que tienen los riesgos asociados al inventario de esta planta sería aún menor que el indicado en la tabla anterior. Por otro lado, al realizar el mismo análisis

para las otras líneas de procesamiento, estas a su vez también tendrían su propio riesgo asociado al proceso de balance metalúrgico.

### **7.2.2 Riesgo a la recuperación**

El riesgo a la recuperación no implica un riesgo económico presente en la planta, debido a que las magnitudes tanto de masa como de finos en las salidas comerciales poseen error 0 (CNAM, 2017).

Aun así, consiste en un riesgo desde un punto de vista estratégico, ya que por las incertidumbres asociadas a los flujos de alimentación y a los flujos destinados a los inventarios, los ingresos futuros pueden diferir de la planificación que se tiene para la mina al no tener una certeza absoluta respecto al tonelaje y contenidos de las distintas componentes que afectan a la producción.

Como se puede observar en las tablas 8, 9 y 10 existe un riesgo asociado a la recuperación global, que varía entre 1,5 %, 1,1 % y 0,5% para los meses 1, 2 y 3 respectivamente. Como se trata de un KPI común en todas las plantas de procesamiento, que generalmente se le asigna una atención especial debido a su importancia, estos valores son muy significativos, debido a que una variación de 1% en la recuperación global tiene grandes implicancias económicas en el plan estratégico de una mina.

La recuperación global del mes 1 posee un valor muy bajo, de 62,2 %, se consultó la validez de este valor con la empresa, que confirmó que se dieron problemas tanto de carácter operacional como de registro de datos en este mes, lo que confirma la incertidumbre superior que se tiene en este mes en particular.

Debido a la heterogeneidad de composición de los minerales, esta incertidumbre es imposible de eliminar, pero si es posible de minimizar siguiendo las normativas asociadas a cada proceso productivo y contando con los equipos adecuados y debidamente calibrados.

## **7.3 Análisis de Sensibilidad**

### **7.3.1 Impacto a los ingresos futuros en riesgo**

Con respecto a los ingresos en riesgo, la variable que más impacta a los resultados es la variación del error asociado a la medición de densidad. Esto se debe a su valor relativamente alto (3,43%) y su incidencia en la determinación de tonelaje de los acopios de concentrado, que se obtiene mediante el producto entre la densidad y el volumen. Uno debe notar que el error asociado al volumen pondera igualmente al error asociado a la densidad, sin embargo, el error asociado a la medición de volumen por topografía es de 1,8%, por lo que una variación porcentual de este error tiene un menor valor absoluto que la misma variación porcentual de la densidad, explicando así la diferencia presente.

En el gráfico 19, se puede como una disminución del 50% en el error asociado a la medición de densidad (resultando en un error asociado de 1,72%), implica una disminución del riesgo asociados a inventarios, llegando a un valor de 1,91 MUSD, una reducción de 739.000 USD correspondiente al 28% del riesgo original. De manera similar, un aumento del 50% al error asociado a la medición de densidad implica que el riesgo económico asociado a inventarios sube a 3,65 MUSD, un aumento de 905 MUSD correspondiente al 28% del riesgo original. Este es un claro ejemplo de cómo el riesgo está directamente asociado con la precisión de las mediciones en la planta, y este hallazgo se extrapola también a los demás errores asociados a las otras variables, con la diferencia en sus magnitudes.

Como se observa en el gráfico 25, las variables que más afectan al riesgo económico, en orden descendiente son: medición de densidad, error de muestreo, medición de volumen, precisión del análisis químico y precisión de pesómetros.

Respecto a cuanto aporta cada riesgo, en los gráficos 27, 29 y 31 se pueden observar la reducción en el riesgo económico, en miles de dólares (kUSD), caso el error asociado a la determinación de cada una de las variables fuera 0. En los 3 casos, la mayor oportunidad para bajar el riesgo esta en la reducción del error asociado a la densidad, que aporta 1.059, 791 y 677 kUSD para los meses respectivamente, lo que corresponde a aproximadamente 66% del riesgo total aportado por las variables anteriormente mencionadas.

### **7.3.2 Impacto a la recuperación en riesgo**

La precisión de muestreo es la variable que mas afecta a la recuperación en riesgo es la precisión asociada al procedimiento de toma de muestras. Esto se ve explicado debido a que este error resulta se propaga hacia el calculo de los finos, el cual también depende de error asociado a la medición de tonelaje como también al error de análisis químico.

Como se observa el gráfico 26, las variables que más incidencia tienen sobre la recuperación en riesgo en orden descendente: error de muestreo, error de análisis químico, precisión de pesómetros, medición de densidad y medición de volumen.

A diferencia del impacto a los ingresos en riesgo, la precisión de los pesómetros influye de manera significativa. Esto se debe a que la recuperación fundamentalmente depende de los flujos involucrados, especialmente los flujos de entradas, donde muchos son medidos por estos instrumentos.

En los gráficos 28, 30 y 31 se puede observar cómo mitigar los errores asociados a la determinación de ciertas variables puede disminuir el riesgo asociado a la recuperación. El error de muestreo por sí solo es responsable por aproximadamente la mitad del riesgo total, y disminuir este error podría resultar en una rebaja de hasta 0,41%, 0,23 % y 0,16 % para los meses 1, 2 y 3 respectivamente.

Finalizando el análisis, se debe notar que reduciendo todos los errores a 0, aún así se tiene un riesgo mayor que cero tanto para la recuperación como para los inventarios. Esto se debe al hecho que se tienen algunos supuestos para ciertos valores de flujos e inventarios (Ej: Inventario En Proceso Concentradora = 14.500 TMS con 0,3% de Cu), y el hecho de asumir estos supuestos conlleva errores que fueron definidos por criterio de experto y no son incluidos en este análisis, debido a que la determinación de su magnitud no es posible con la información disponible para la realización de este estudio.

## 8. Conclusiones y Recomendaciones

La incertidumbre asociada a los procesos es una problemática que todas las empresas enfrentan de una forma u otra, y en la minería en particular, la reducción de este factor corresponde al desafío fundamental que enfrenta la industria, debido a la heterogeneidad de composición de la corteza terrestre. Lo anterior implica que no solo se debe disminuir la incertidumbre para poder establecer la forma y secuencia del cuerpo para que su extracción sea viable, pero también de los posibles destinos que se le asigna a cada secuencia unitaria de extracción, el cual consiste en líneas de procesamiento, que conllevan nuevas incertidumbres. La reducción de esta incerteza es de carácter fundamental para poder cuantificar el riesgo y justificar la inversión.

El presente estudio estableció una metodología que permite definir y cuantificar los principales factores de riesgo asociados a un proceso de balance metalúrgico, como también reflejar estos riesgos como un valor monetario.

Durante el desarrollo de este estudio, se identificaron las principales variables que afectan a los resultados de un balance metalúrgico, y se enfocó en 2 de estas: el tonelaje masico y el tonelaje de finos de cobre.

Para poder establecer los riesgos asociados a la determinación de cada una de estas variables, se abordaron los instrumentos y metodologías utilizadas en su identificación, identificando las componentes que aportaban algún grado de incertidumbre, y luego relacionándolas a través de la fórmula de propagación de error para poder determinar el valor del error asociado, tanto absoluto como relativo. A partir de esto, la principal conclusión de este estudio es que **los riesgos asociados a un proceso de balance metalúrgico se encuentran directamente asociados a la calidad de las mediciones** que se tienen en el proceso, como también a la **calidad del modelo de balances**, una mayor calidad asociada a un dato se ve reflejada con una menor tolerancia relativa asociada a este.

La calidad de las mediciones esta directamente asociada a la precisión de los instrumentos que se utilizan para llevarla a cabo, la cual depende de el error natural asociado al equipo (comúnmente entregado por el fabricante del mismo), como también a la rigurosidad con la que se siguen las normas establecidas para la realización de las calibraciones, referente tanto a la frecuencia como también a los estándares que se deben seguir para llevar este proceso a cabo.

La calidad del modelo de balances está asociada a como se determinan los valores de flujos e inventarios asociados a cada nodo, como también a la cantidad de instrumentos de medición directa que se tiene. Al tener flujos o inventarios cuyos valores son calculados a partir de otros flujos y/o inventarios, por la naturaleza de la formula de propagación de errores el error relativo asociado a este calculo es fundamentalmente mayor que el error relativo de las componentes medidas

directamente y a medida que un flujo o inventario más alejado se encuentre de una medición directa, mayor es el error que se encuentra asociado a su valor.

El principal impacto que pueden generar los riesgos asociados al proceso de balance metalúrgico, están asociados a una incertidumbre económica que se tiene sobre los inventarios y una incertidumbre estratégica que se tiene sobre el valor de la recuperación de finos.

La incertidumbre económica existe debido a que la presencia de un grado de incertidumbre asociado tanto al valor del tonelaje masico como a la incertidumbre de la ley de los metales de interés, lo que se ve reflejado en una incertidumbre asociada al tonelaje de finos. Lo último implica un riesgo asociado a los inventarios, debido a que los finos contenidos pueden ser cuantificados y vendidos en algún periodo, lo que se traduce en un riesgo económico. Para el caso de este estudio en particular, los principales inventarios son cuantificados a través de medición de volumen (por topografía) y medición de densidad (por picnómetro). Los finos son cuantificados a partir del valor masico y la ley mediante análisis químico. Respecto al caso de estudio analizado, se demostró que existe un riesgo económico estimado que varía entre **1,77 hasta 2,66 MUSD**. El aumento de la calidad de las mediciones contribuye de manera significativa a la reducción de este riesgo, **principalmente la disminución del error asociado al cálculo de densidad**, que puede reducir este valor en hasta 1,06 MUSD.

Respecto a la incertidumbre asociada a la recuperación, esta existe debido a la naturaleza de su fórmula, que depende tanto de la entrada de minerales como también al consumo de inventarios que se tiene en cada nodo, los cuales poseen una incertidumbre propia asociada. Si bien esto no implica un riesgo económico, debido a que las salidas no poseen error asociado (CNAM, 2017), si tiene implicancias estratégicas, debido a que la recuperación es un factor fundamental tanto para estimar la producción futura como para evaluar la eficiencia de los procesos. El riesgo encontrado para la recuperación varió entre **0,5 % y 1,5 %**, valores que pueden impactar de manera significativa al plan estratégico de una mina, inclusive transformando recursos que inicialmente serian considerados recursos en reservas o viceversa. **La variable que más contribuye al riesgo asociado a la recuperación corresponde al error asociado al proceso de muestreo**, y la disminución de este error puede disminuir la recuperación en riesgo en hasta 0,41% (valor absoluto).

A modo de recomendación, se recomienda la evaluación de los impactos que las incertidumbres puedan tener en un proceso de reconciliación metalúrgica, y como la sensibilización de estas puedan afectar a los ingresos y a la recuperación estimada.

Por último, el estudio fomenta la importancia de contar con instrumentos de calidad, y de seguir un plan de calibraciones de acuerdo con los estándares, asegurando su cumplimiento dentro de los plazos establecidos. Esto tiene el fin de minimizar los

errores y consecuentemente los riesgos asociados a la planificación estratégica, asegurando por una parte las buenas prácticas que se deben seguir en la industria.



## 9. Bibliografía

AMIRA. (2007). Código de Prácticas para la Contabilidad Metalúrgica.

Barlow, R. (1989). *Statistics: A Guide to the Use of Statistical Methods in the Physical Sciences*. John Wiley & Sons.

Bevington, P. R., & Robinson, D. K. (2003). *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*. McGraw-Hill.

Brown, A., & García, M. (2021). Variability Challenges in Metallurgical Reconciliation. *Mineral Processing Journal*, 30(2), 87-102.

Brown, A., & White, B. (2019). Challenges in Metallurgical Balance Calculations. *Journal of Metallurgical Engineering*, 25(3), 123-135.

Codelco (2019). Normativa CNAM-021, Rev-0. Estándar para la Calibración de Flujómetros.

Codelco (2021). Normativa CNAM-007, Rev-3. Condiciones de Estaciones de Muestreo de Flujos y Transferencia de Productos.

Codelco (2021). Normativa CNAM-014, Rev-3. Sistemas de Pesajes em Correas Transportadoras.

Codelco (2021). Normativa CNAM-018, Rev-1. Estándar Para el Muestreo de Concentrados en Camiones.

Codelco (2021). Normativa CNAM-020, Rev-1. Básculas de Pesaje para Camiones.

CRIRSCO. (2019). Code for reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Mineral Reserves.

Fleischer, M. (1969). How many minerals? *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials*, 54(5-6), 960-961.

García, C., et al. (2020). Integrating Artificial Intelligence for Real-time Metallurgical Balancing. *International Journal of Mining Technology*, 40(2), 67-82.

Gy, P. (2012). *Sampling of particulate materials theory and practice*. Elsevier.

Holmes, R. J. (2004). Correct sampling and measurement—the foundation of accurate metallurgical accounting. *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, 74(1), 71-83.

Jones, R. (2016). Comprehensive Metallurgical Balancing: From Extraction to Smelting. *Metallurgical Review*, 18(4), 210-225.

JORC. (2012). Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves.

Lerchs, H. and Grossman, F. (1965) Optimum Design of Open-Pit Mines. *Transaction CIM*, 58, 47-54.

Ministerio de Obras Públicas. (2015). Decreto Supremo 158 de 1980 [con fuerza de ley]. Por Medio del Cual se Fija el Peso Máximo de los Vehículos que Pueden Circular por Caminos Públicos. 29 de enero de 198. Ley Chile.

National Geographic. (2020). Minerals & Gems. National Geographic. Recuperado de [nationalgeographic.com/science/article/minerals-gems]

OIML R-76-1. (2006). Non-automatic weighing instruments.

Pérez, L., et al. (2022). Advancements in Artificial Intelligence for Real-time Metallurgical Reconciliation. *International Journal of Mining Technology*, 45(1), 56-71.

Peters, W. C. (1987). Exploration and mining geology.

Pitard, F. F. (1994). Exploration of the “Nugget Effect”. In *Geostatistics for the Next Century: An International Forum in Honour of Michel David’s Contribution to Geostatistics*, Montreal, 1993 (pp. 124-136). Springer Netherlands.

Rodríguez, S., et al. (2017). Metallurgical Reconciliation for Improved Recovery Assessment. *Journal of Metallurgical Engineering*, 22(4), 189-203.

SAMREC. (2016). South African Mineral Reporting Codes.

Skinner, B. J. (1979). Earth resources. *Proceedings of the national Academy of Sciences*, 76(9), 4212-4217.

Smith, J., & Johnson, R. (2019). Integrated Approach to Metallurgical Reconciliation Using Simulation. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 38(3), 145-160.

Smith, J., et al. (2018). Application of Metallurgical Balance in Flotation Processes. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 36(1), 45-56.

Taylor, J. R. (1997). *An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements*. University Science Books.

## 10. Anexos

### Anexo A: Características de Flujos e inventarios

Flujos Mes 1			
Flujos	TMS	Ley Cu %	TMF Cu
Mineral a Flotación	505.302	0,44	2.233
Escoria Botadero a Flotación	10.430	0,92	96
Escorias Botadero a PTR	-	-	-
Concentrado Recuperado por limpiezas	2.231	18,40	410
Concentrados Externos	-	-	-
Relave	511.102	0,27	1.358
Concentrado Mixto	4.630	20,99	972
Relave Final	510.877	0,26	1.325
Concentrado a Ventas 1	527	14,05	74
Concentrado 2	-	-	-
Concentrado Moly	-	-	-
Concentrado Cobre	5.200	20,93	1.089
Concentrado Moly a Ventas	-	-	-
Limpiezas de Concentrado a Ventas	4.959	18,43	914
Concentrado a Ventas 2	5.697	21,00	1.197
Pérdidas por Manejo	-	-	-
Concentrado 1	-	-	-
Concentrado 1 a Ventas	-	-	-
Pérdidas por Manejo	-	-	-
Concentrado Escorias a Ventas	-	-	-
Concentrado directo a Silos	-	-	-
Concentrados de Mezcla a Silos	-	-	-
Salida Molibdeno	75	-	-
Concentrado Escoria	474	32,23	153

Tabla 13: Flujos Mes 1

Inventarios Mes 1			
Inventarios	TMS	Ley Cu %	TMF Cu
En Proceso Concentradora	14.500	0,30	43
En Proceso Planta de Tratamiento de Relaves	-	-	-
Canchas de Secado	9	14,05	1
En Proceso Planta Moly	-	-	-
Espesadores de Concentrado Mixto	-	-	-
Espesadores de Concentrado Cobre	570	23,26	133
Maxisacos Concentrado Moly	-	-	-
En Proceso Planta de Filtrado	-	-	-
Acopio de Concentrado	1.430	20,78	297
Canchas de Limpieza	-	-	-
Concentrados Corporativos en Canchas	5.346	29,80	1.593
Concentrados Externos en Canchas	17.967	27,01	4.853
Concentrados Propios en Canchas	5.874	19,36	1.137
Concentrado Flotación de Escoria en Canchas	753	33,19	250

**Tabla 14: Inventarios Mes 1**

Flujos Mes 2			
Flujos	TMS	Ley Cu %	TMF Cu
Mineral a Flotación	528.875	0,43	2.284
Escoria Botadero a Flotación	21.069	0,96	203
Escorias Botadero a PTR	-	-	-
Concentrado Recuperado por limpiezas	882	21,07	186
Concentrados Externos	15.446	23,94	3.698
Relave	543.002	0,19	1.009
Concentrado Mixto	6.942	21,29	1.478
Relave Final	542.790	0,18	982
Concentrado a Ventas 1	106	12,67	13
Concentrado 2	-	-	-
Concentrado Moly	-	-	-
Concentrado Cobre	6.942	21,29	1.478
Concentrado Moly a Ventas	-	-	-
Limpiezas de Concentrado a Ventas	305	20,52	63
Concentrado a Ventas 2	3.218	21,35	687
Pérdidas por Manejo	-	-	-
Concentrado 1	441	20,41	90
Concentrado 1 a Ventas	-	-	-
Pérdidas por Manejo	373	26,66	99
Concentrado Escorias a Ventas	-	-	-
Concentrado directo a Silos	-	-	-
Concentrados de Mezcla a Silos	28.440	26,62	7.572
Salida Molibdeno	3	-	-
Concentrado Escoria	3.078	38,53	1.186

Tabla 15: Flujos Mes 2

Inventarios Mes 2			
Inventarios	TMS	Ley Cu %	TMF Cu
En Proceso Concentradora	14.500	0,30	43
En Proceso Planta de Tratamiento de Relaves	-	-	-
Canchas de Secado	115	12,67	15
En Proceso Planta Moly	-	-	-
Espesadores de Concentrado Mixto	-	-	-
Espesadores de Concentrado Cobre	570	23,26	133
Maxisacos Concentrado Moly	-	-	-
En Proceso Planta de Filtrado	-	-	-
Acopio de Concentrado	4.712	21,18	998
Canchas de Limpieza	577	21,35	123
Concentrados Corporativos en Canchas	804	28,24	227
Concentrados Externos en Canchas	15.429	25,26	3.898
Concentrados Propios en Canchas	2.490	18,73	466
Concentrado Flotación de Escoria en Canchas	1.368	39,78	544

**Tabla 16: Inventarios Mes 2**

Flujos Mes 3			
Flujos	TMS	Ley Cu %	TMF Cu
Mineral a Flotación	436.681	0,42	1.816
Escoria Botadero a Flotación	18.480	0,98	180
Escorias Botadero a PTR	-	-	-
Concentrado Recuperado por limpiezas	618	21,28	132
Concentrados Externos	37.484	28,27	10.599
Relave	449.210	0,16	741
Concentrado Mixto	5.951	21,10	1.255
Relave Final	448.927	0,16	710
Concentrado a Ventas 1	148	13,32	20
Concentrado 2	-	-	-
Concentrado Moly	-	-	-
Concentrado Cobre	5.951	21,10	1.255
Concentrado Moly a Ventas	-	-	-
Limpiezas de Concentrado a Ventas	-	-	-
Concentrado a Ventas 2	5.118	21,18	1.084
Pérdidas por Manejo	-	-	-
Concentrado 1	-	-	-
Concentrado 1 a Ventas	-	-	-
Pérdidas por Manejo	437	26,37	115
Concentrado Escorias a Ventas	-	-	-
Concentrado directo a Silos	-	-	-
Concentrados de Mezcla a Silos	43.457	26,45	11.496
Salida Molibdeno	-	-	-
Concentrado Escoria	3.045	32,03	975

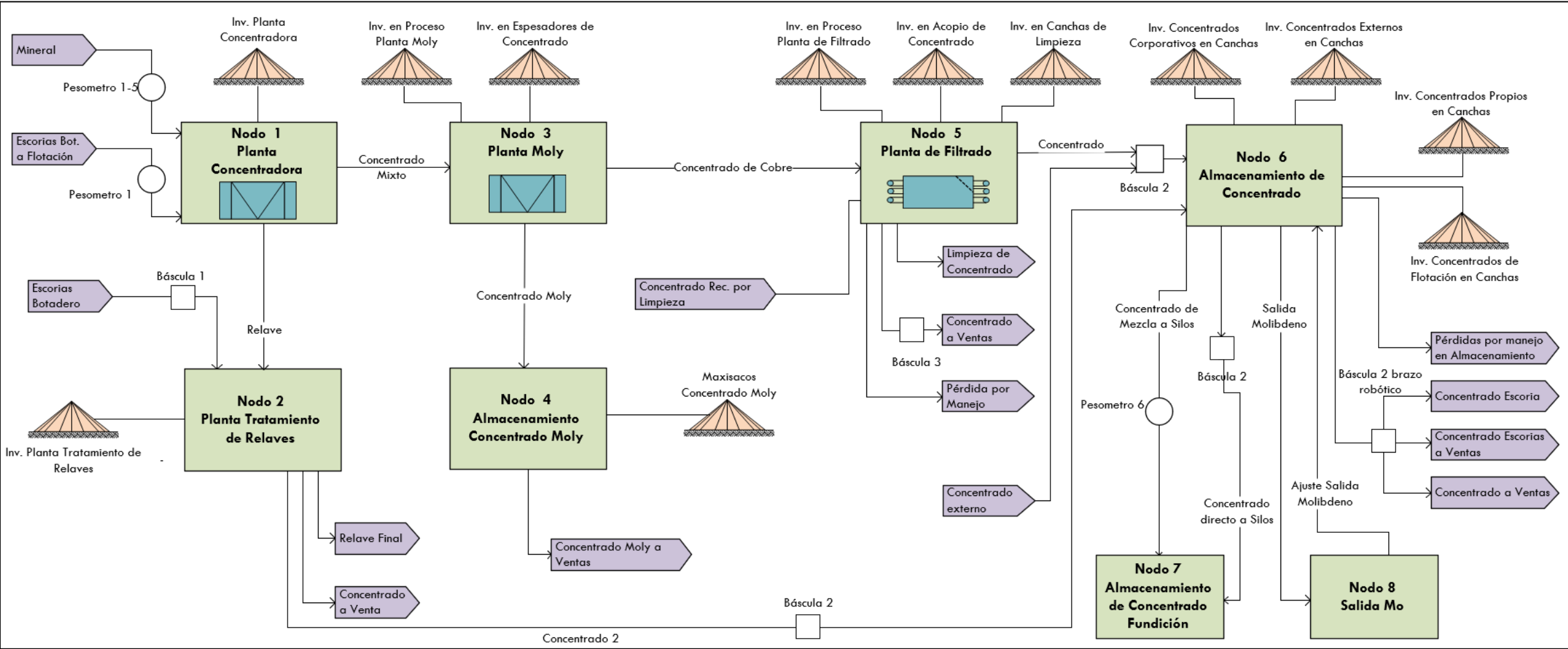
**Tabla 17: Flujos Mes 3**

Inventarios Mes 3			
Inventarios	TMS	Ley Cu %	TMF Cu
En Proceso Concentradora	14.500	0,30	43
En Proceso Planta de Tratamiento de Relaves	-	-	-
Canchas de Secado	250	10,32	26
En Proceso Planta Moly	-	-	-
Espesadores de Concentrado Mixto	-	-	-
Espesadores de Concentrado Cobre	570	23,26	133
Maxisacos Concentrado Moly	-	-	-
En Proceso Planta de Filtrado	-	-	-
Acopio de Concentrado	5.544	21,10	1.170
Canchas de Limpieza	1.195	21,31	255
Concentrados Corporativos en Canchas	9.142	31,42	2.872
Concentrados Externos en Canchas	6.111	30,45	1.861
Concentrados Propios en Canchas	1.071	20,74	222
Concentrado Flotación de Escoria en Canchas	403	35,61	143

**Tabla 18: Inventarios Mes 3**



**Anexo B: Diagrama general de la planta concentradora**



**Figura 5: Modelo de Balances**

