

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA Y METALÚRGICA**



**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL**

**“ANÁLISIS DE LAS INCERTIDUMBRES PARA LA MEJORA  
DE LA CONFIABILIDAD EN LA CONTABILIDAD  
METALÚRGICA BASADO EN LA TEORÍA DE MUESTREO”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO METALURGISTA**

**ELABORADO POR  
JOHN WILLIAM RAMIREZ CAMONES**

**ASESOR  
DR. ING. ALBERTO LANDAURO ABANTO**

**LIMA-PERU**

**2022**

#### DEDICATORIA:

A mis padres por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad; muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que se incluye este. Me formaron con reglas y con algunas libertades, pero al final de cuentas, me motivaron constantemente para alcanzar mis anhelos.

Gracias papá y mamá.

## RESUMEN

El punto de inicio clave para una correcta contabilidad metalúrgica es la colección de muestras representativas para determinar el contenido metálico y leyes de las corrientes del proceso y así tener un sistema de contabilidad metalúrgica confiable. Sin embargo, los errores son parte inherente de toda actividad humana, en la industria de la minería, las magnitudes de estos son importantes debido a las limitaciones tecnológicas de los equipos y dispositivos de medición que se emplean y por la variabilidad natural del mineral que se alimenta al proceso productivo.

Así la incertidumbre existente en la estimación de la recuperación dependerá de las precisiones de mediciones de cada una de sus componentes.

El presente proyecto tiene el objetivo de “Proponer un nuevo método de cálculo de recuperación para poder reducir la incertidumbre asociada a la estimación de la recuperación y producción de un sistema de contabilidad”.

Teniendo en cuenta las necesidades de poder cuantificar los errores en un sistema de contabilidad, se desarrolló el proyecto con las siguientes actividades:

- Revisión de información relativa a la contabilidad metalúrgica inicial de un proceso metalúrgico que involucra etapas de gravimetría, lixiviación y flotación de oro y plata.
- Auditoria y evaluación del sistema de contabilidad inicial.
- Evaluación del estado de los equipos de toma de muestra y evaluación de protocolos de muestreo y preparación de muestras.
- Evaluación de incertidumbre en la recuperación del método inicial.
- Evaluación de un método propuesto para estimación de producción y recuperación metalúrgica – targets del sistema de contabilidad.
- Presentación y discusión de resultados.

De acuerdo con la evaluación de los sistemas de muestreo y de la metodología del sistema contabilidad metalúrgica inicial (método usado para estimar recuperación y producción):

- Se infiere que la incertidumbre para la estimación de producción y recuperación de los metales preciosos (Au, Ag) es alta y genera resultados atípicos y poco confiables.
- Debido a la dificultad de obtener muestras representativas y/o realizar algunas mediciones en diversos puntos de muestreo, se propuso: Modificar la metodología de estimación de algunas mediciones, implementar mediciones alternas y los cortadores deben ser reemplazados o modificados para obtener muestras representativas al flujo de pulpa, tamaño de partícula, concentración de sólidos, etc.

Debido a que no se conoce la incertidumbre de las mediciones del proceso se empleó 3 casos o escenarios para definir la naturaleza de los errores de las mediciones (incertidumbres):

- Rango Teórico: representa el mínimo valor de incertidumbre que se logra obtener, es el caso ideal, en el que se cuenta con el equipo de muestreo en perfecto estado, adecuadamente diseñado, instalado y operado.
- Rango Aceptable: es lo que la industria acepta como tolerable, dentro de límites económicos y prácticos, aunque este rango varía en función a la utilización de la información (por ejemplo, las exigencias de calidad de un ensayo son diferentes para control de operación que para contabilidad o para comercialización)
- Rango Crítico: errores de esta magnitud o mayor generan un impacto considerable en el caso de usar esta información ya sea para fines operativos o de contabilidad.

Los resultados de la estimación de la incertidumbre en la recuperación y producción total en el sistema de contabilidad del proceso, mostraron diferencias entre las incertidumbres de la producción de Au por el método inicial y método propuesto; de

esto, considerando que el precio del oro sea de 1,780 USD/oz, entonces se ha disminuyó la incertidumbre del sistema de contabilidad entre 331 KUS\$ a 1,399 KUS\$ por mes. Recordar que este valor no es considerado un ahorro; sino, tener un valor producción de millones de dólares con una mejor precisión.

Por lo tanto, se recomienda realizar las siguientes actividades y cambios:

- Implementar un método propuesto de estimación de la recuperación y producción que reduzca la incertidumbre de los targets del sistema de contabilidad.
- Reemplazar o modificar los cortadores instalados, mejora la confiabilidad de extracción de una muestra representativa.
- Evaluar y optimizar el protocolo de muestreo para las muestras extraídas de los cortadores.

En general, una inversión en mejorar la precisión del sistema de contabilidad, partiendo de la teoría de muestreo y propagación de errores, resultará en tener resultados de producción sincerados y de mayor confianza para así tener una mejor confianza para la futura toma de decisiones como inversión, ganancias, etc.

**Palabras claves:** Análisis de incertidumbres, confiabilidad, sistema de contabilidad metalúrgica, teoría de muestreo, propagación de errores, protocolos de muestreo.

## ABSTRACT

The key starting point for proper metallurgical accounting is the collection of representative samples to determine the metal content and grades of the process streams for a reliable metallurgical accounting system. However, errors are an inherent part of all human activity, in the mining industry, the magnitudes of these are important due to the technological limitations of the equipment and measurement devices that are used and due to the natural variability of the mineral that is used. feeds the production process.

Thus, the uncertainty in the estimation of recovery will depend on the precision of measurements of each of its components.

The objective of this project is to "Propose a new recovery calculation method in order to reduce the uncertainty associated with estimating the recovery and production of an accounting system".

Taking into account the needs to be able to quantify errors in an accounting system, the project was developed with the following activities:

- Review of information related to the initial metallurgical accounting of a metallurgical process that involves gravimetry, leaching and gold and silver flotation stages.
- Audit and evaluation of the initial accounting system
- Evaluation of the state of the sampling equipment and evaluation of sampling protocols and sample preparation.
- Evaluation of uncertainty in the recovery of the initial method
- Evaluation of a proposed method for estimating production and metallurgical recovery - targets of the accounting system.

- Presentation and discussion of results.

According to the evaluation of the sampling systems and the methodology of the initial metallurgical accounting system (method used to estimate recovery and production):

- It is inferred that the uncertainty for the estimation of production and recovery of precious metals (Au, Ag) is high and generates atypical and unreliable results.
- Due to the difficulty of obtaining representative samples and / or performing some measurements at various sampling points, it was proposed to: Modify the estimation methodology of some measurements, implement alternate measurements and the cutters should be replaced or modified to obtain representative samples for the flow. pulp, particle size, solids concentration, etc.

Since the uncertainty of the process measurements is not known, 3 cases or scenarios were used to define the nature of the measurement errors (uncertainties):

- Theoretical Range: represents the minimum uncertainty value that can be obtained, it is the ideal case, in which the sampling equipment is in perfect condition, properly designed, installed and operated.
- Acceptable Range: is what the industry accepts as tolerable, within economic and practical limits, although this range varies depending on the use of the information (for example, the quality requirements of a test are different for operation control than for accounting or marketing)
- Critical Range: errors of this magnitude or greater generate a considerable impact in the case of using this information either for operational or accounting purposes.

The results of the estimation of the uncertainty in the recovery and total production in the accounting system of the process, showed differences between the uncertainties of the Au production by the initial method and the proposed method; From this, considering that the price of gold is 1,780 USD / oz, then the uncertainty of the accounting system has decreased between 331 KUS \$ to 1,399 KUS \$ per month. Remember that this value is not considered a saving; but, have a production value of millions of dollars with better precision.

Therefore, the following activities and changes are recommended:

- Implement a proposed recovery and production estimation method that reduces the uncertainty of the accounting system targets.
- Replacing or modifying installed cutters improves the reliability of extraction of a representative sample.
- Evaluate and optimize the sampling protocol for the samples taken from the cutters.

In general, an investment in improving the accuracy of the accounting system, based on the theory of sampling and propagation of errors, will result in sincere and more reliable production results in order to have better confidence for future decision making as an investment, earnings, etc.

**Keywords:** Uncertainty analysis, reliability, metallurgical accounting system, sampling theory, propagation of errors, sampling protocols.

## PROLOGO

El informe de suficiencia tiene como finalidad proponer realizar un análisis de incertidumbres en el balance metalúrgico para poder mejorar la confiabilidad del sistema de contabilidad.

El contenido se ha estructurado en cuatro capítulos, los cuales tratan de:

En el capítulo I, se describe las generalidades, la problemática de investigación, el objetivo de estudio y los antecedentes investigativos que son resúmenes de investigaciones que refieren como base o lineamientos en el presente estudio.

En el capítulo II, se presenta bases teóricas y el marco conceptual, donde se describe al sistema de contabilidad metalúrgica, el entorno de diferentes tipos de incertidumbres que se mencionan en la teoría de muestreo y la propagación de errores o incertidumbres a través de las mediciones.

En el capítulo III, se describe al sistema de contabilidad del proceso junto con la base de datos a emplear; además, se realiza los análisis de incertidumbres de los targets del sistema de contabilidad metalúrgica inicial como la de una metodología propuesta.

En el capítulo IV, se efectúa una evaluación comparativa de como la metodología de un sistema de contabilidad reduce su incertidumbre empleando la teoría de muestreo.

## ÍNDICE

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Generalidades .....	1
1.2 Descripción del Problema de Investigación .....	1
1.3 Objetivos del Estudio .....	3
1.4 Hipótesis.....	3
1.4.1 Variables e Indicadores .....	3
1.5 Antecedentes Investigativos .....	4
1.5.1 Ámbitos Internacionales.....	4
1.5.2 Ámbitos Nacionales .....	5
1.5.3 Ámbitos Locales.....	6
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	7
2.1 Marco Teórico .....	7
2.1.1 Contabilidad Metalúrgica .....	7
2.1.2 Teoría de Muestreo - TOS.....	10
2.1.3 Propagación de Errores .....	12
2.2 Marco Conceptual .....	14
CAPÍTULO III DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN .....	16
3.1 Proceso General.....	16
3.1.1 Unidad de Análisis .....	16
3.1.2 Descripción del Proceso General .....	17
3.1.3 Mediciones Experimentales del Proceso.....	19
3.2 Sistema de Contabilidad Inicial.....	20
3.2.1 Metodología .....	20
3.2.2 Estimación de la Recuperación y Producción .....	22

3.2.3	Caso Práctico: Incertidumbre en la Recuperación Gravimétrica de Oro .....	24
3.2.4	Estimación de las Incertidumbres de Recuperación y Producción de Finos..	26
3.3	Sistema de Contabilidad Propuesto.....	33
3.3.1	Metodología .....	33
3.3.2	Incertidumbres de mediciones experimentales .....	36
3.3.3	Resultados .....	38
	CAPÍTULO IV ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	41
4.1	Análisis de Comparación de Resultados .....	41
	CONCLUSIONES .....	48
	RECOMENDACIONES .....	50
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51
	ANEXOS .....	52

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Ciclo de vida de la contabilidad metalúrgica.....	8
Figura 2.2. Clasificación de errores de Gy según su origen.....	11
Figura 2.3. Propagación de incertidumbre para una medición.....	13
Figura 3.1. Ubicación de unidad minera Orcopampa – BVN .....	17
Figura 3.2. Diagrama de flujo del proceso de la planta concentradora.....	18
Figura 3.3. Esquema resumido del proceso inicial .....	20
Figura 3.4. Distribución de incertidumbre de gravimetría – Caso práctico.....	26
Figura 3.5. Distribución de las incertidumbres - Recuperación total de Au y Ag .....	30
Figura 3.6. Distribución de las incertidumbres - Producción total de Au y Ag.....	31
Figura 3.7. Esquema con mediciones – Método alternativo .....	33
Figura 3.8. Distribución de incertidumbre – Recuperación y producción total Au ...	40
Figura 4.1. Intervalo de confianza de la recuperación de Au por secciones .....	42
Figura 4.2. Intervalo de confianza de la recuperación de Ag por secciones .....	44
Figura 4.3. Intervalo de confianza de la producción de Au por secciones.....	46
Figura 4.4. Intervalo de confianza de la producción de Ag por secciones.....	47

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Tabla de indicadores de la variable independiente .....	3
Tabla 2.1. Cadena de custodia típica entre una fuente de mineral y metal producto... 9	9
Tabla 3.1. Mediciones experimentales de principales flujos del proceso .....	19
Tabla 3.2. Precisión de las componentes de medición- Caso práctico.....	24
Tabla 3.3. Descomposición de términos de la incertidumbre .....	25
Tabla 3.4. Precisión de las mediciones en el alimento general – Método inicial .....	27
Tabla 3.5. Precisión de las mediciones en gravimetría– Método inicial.....	27
Tabla 3.6. Precisión de las mediciones flotación – Método inicial.....	28
Tabla 3.7. Incertidumbres en la recuperación de Au .....	28
Tabla 3.8. Incertidumbres en la recuperación de Ag .....	29
Tabla 3.9. Incertidumbres en la producción de Au .....	29
Tabla 3.10. Incertidumbres en la producción de Ag .....	29
Tabla 3.11. Precisión de las mediciones en alimento general – Método alternativo .	36
Tabla 3.12. Precisión de las mediciones en lixiviación – Método alternativo.....	36
Tabla 3.13. Precisión de las mediciones en gravimetría – Método alternativo.....	37
Tabla 3.14. Precisión de las mediciones en flotación – Método alternativo.....	37
Tabla 3.15. Incertidumbres en la recuperación de Au – Método Propuesto .....	38
Tabla 3.16. Incertidumbres en la recuperación de Ag - Método Propuesto.....	38
Tabla 3.17. Incertidumbres en la producción de Au - Método Propuesto .....	38
Tabla 3.18. Incertidumbres en la producción de Ag - Método Propuesto .....	39

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Generalidades**

Muchas empresas se enfocan en implementar una nueva tecnología, modificar equipos, etc, con el fin de una mejor producción de metales preciosos; sin embargo, un detalle que se obvia generalmente es el de mejorar el sistema de contabilidad metalúrgica, que, a través de muestreos deficientes, ensayos con errores altos, etc. ocasionan tener un valor poco confiable de la producción mensual de estos metales.

Por lo tanto, realizar un análisis de incertidumbres basado en la teoría de muestreo permitirá identificar las mediciones que impactan en la estimación de la producción, a través de la propagación de sus incertidumbres o errores de medición; de esta manera, nos permitirá estimar los valores de producción con mayor confiabilidad y por consecuencia tener una mejor toma de decisiones para posteriores inversiones, implementaciones de nuevas tecnologías, etc.

### **1.2 Descripción del Problema de Investigación**

Muchas veces durante la etapa de diseño de una planta concentradora, se subvalora la importancia de equipos para tomar muestras, y durante el ejercicio de mejora y reducción del CAPEX los sistemas son removidos, posteriormente son instalados en ubicaciones inaccesibles para control y monitoreo de su operación o los equipos dimensionados son inadecuados por su “bajo costo”. En otras ocasiones, los sistemas

de muestreo no son evaluados, durante la etapa de ingeniería para ampliar la capacidad de producción y los equipos finalmente son sub-dimensionados y entregando muestras con incertidumbres, generando un problema de “pseudo – confianza” en la calidad de la muestra, además le atribuyen un alto grado de confianza por que proviene de un cortador automático, así estén operando con flujos que sobrepasan su capacidad de diseño. (Gran Colombia Gold, Planta Maria Dama (2012). “Desarrollo de Bases para el Sistema de Contabilidad Metalúrgica - Planta Beneficio Maria Dama”) [5].

También, en muchas plantas que el inadecuado muestreo realizado sobre las corrientes de entrada-salida y agravada por el mal sub-muestreo realizado en laboratorio; todo esto produce que, de alguna manera u otra, las muestras obtenidas tengan errores que, al utilizar los resultados de los ensayos realizadas con ellas, los metalúrgicos miden el desempeño de la operación y toman decisiones basados en mediciones con alta incertidumbre. (Loimia J.; et.al (2015). “Evaluation of Sampling Error Sources in a Multiple Cutter Metallurgical Sampler”) [6].

Además, estas incertidumbres en los ensayos químicos son propagados entre otros cálculos y estimaciones que finalmente son utilizados en estimaciones de los balances diarios, reportes de producción, cierres de contabilidad mensual, etc, en lo general en la reconciliación de datos y todo conlleva a obtener en tener un sistema de contabilidad metalúrgica de calidad cuestionable e ineficiente control de procesos. Estos problemas afectan en gran medida el rendimiento de la planta, el costo de operación y el resultado es una enorme pérdida de dinero para la empresa en cuestión y también una pérdida de grandes oportunidades. (Brochot, S.; Durance, M. (2012). “A New Approach to Metallurgical Accounting”) [2].

Por lo tanto, en la presente investigación la formulación del problema corresponde a:  
¿En qué medida los errores de medición inciden en que no se tenga un sistema de contabilidad metalúrgica confiable?

### 1.3 Objetivos del Estudio

Reducir la variabilidad de un sistema de contabilidad en base a un análisis de incertidumbre

### 1.4 Hipótesis

Un análisis de las incertidumbres basado en la teoría de muestreo influirá en la mejora de la confiabilidad del sistema de contabilidad metalúrgica.

#### 1.4.1 Variables e Indicadores

- Variable Independiente (VI): Análisis de las incertidumbres basado en la teoría de muestreo.
- Variable Dependiente (VD): La confiabilidad del sistema de contabilidad metalúrgica.

**Tabla 1.1.** Tabla de indicadores de la variable independiente

VARIABLES	INDICADORES
VI: Análisis de las incertidumbres basado en la teoría de muestreo y balance estadístico.  VD: La confiabilidad del sistema de contabilidad metalúrgica.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Varianza de los diferentes tipos de error de las mediciones de masa y ensayos químicos.</li> <li>• Error relativo en la recuperación de metales valiosos.</li> <li>• Incertidumbre en la producción de finos de metales.</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

## 1.5 Antecedentes Investigativos

A continuación, se describen antecedentes relacionados al tema de investigación, realizados en los ámbitos internacionales, nacionales y locales.

### 1.5.1 Ámbitos Internacionales

Dominy, S. (2016), “Importance of good sampling practice throughout the gold mine value chain” [4], menciona que dentro de la cadena de valor de una industria minera se toman decisiones de acuerdo a los resultados a partir de la colección de muestras representativas como en las etapas de exploración, estimación de recursos, diseños de planta, producción a través de los balances, etc., donde un ineficiente protocolo de diseño de muestreo incrementa la variabilidad y como consecuente se eleva el riesgo del proyecto, teniendo pérdidas intangibles y financieras. En esta referencia, se ejemplifican diversos casos de estudio donde se dieron pérdidas financieras entre US\$2M y US\$12M debido al diseño inadecuado del protocolo de muestreo y también se mencionan las acciones correctivas que fueron tomadas; entre estos casos, los problemas comunes fueron ineficiente metodología de extracción de muestras, inapropiada preparación de muestra, ausencia de evaluación de controles de calidad de ensayos, QAQC, entre otros.

Minnitt, R. (2014), “Sampling in the South African minerals industry” [7], reveló que en las últimas tres décadas, en las evaluaciones de los muestreos y las prácticas que se realizan en la industria minera de Sudáfrica, los costos potenciales y ocultos, que han sido ocasionado por un ineficiente muestreo, han tomado relevancia en ser identificados, y cuantificados para así hallar alternativas de mitigación de estos; puesto que, en muchas operaciones han ocasionado generar una inversión no presupuestada en nuevos diseños de planta con equipos de muestreo de última generación; otras operaciones tienen enormes riesgos de ingreso; en caso de proyectos mineros han sido vulnerables en su desarrollo temprano de etapas de factibilidad y prefactibilidad. Por estas razones, la importancia del muestreo es reconocida cada vez más y que para garantizar un adecuado muestreo se está aplicando recursos humanos y financieros. Todo esto es basado la identificación del tipo de error que surgen por la heterogeneidad

de las muestras – características de la muestra, por el proceso en planta, por el equipo de muestreo y por procedimientos analíticos.

Un estudio realizado en enero del 2012 en Gran Colombia Gold - Planta Maria Dama (2012), “Desarrollo de Bases para el Sistema de Contabilidad Metalúrgica - Planta Beneficio Maria Dama” [5], determinó que el estado de la contabilidad metalúrgica en la Planta de Beneficio de Maria Dama estaba por debajo del estándar como resultado de un proceso prolongado de inactividad. Las muestras extraídas en cada punto de muestreo incurrían en errores de delimitación, extracción, ponderación y preparación. Debido a esto, el estudio estableció protocolos de trabajo, manejo de información e identificar los errores de mayor impacto para que tomen acciones y así reducir los sesgos producidos.

### **1.5.2 Ámbitos Nacionales**

Carneiro R. (2018), “Contabilidad Metalúrgica – I International Congress on Minerals Sampling” [3], menciona que el principal fin de la contabilidad metalúrgica es proporcionar información valiosa de la producción de las Operaciones de planta, como recuperación, balances de masa, finos producidos, etc; por esta razón, cuanto este sistema haya sido diseñado óptimamente, se tendrá una mejor herramienta que mida la eficiencia del proceso, identificación de problemas y una adecuada toma de decisiones que influyan en proceso. Aquellos factores que tienen mayor impacto en este sistema son el muestreo y los ensayos químicos. Mientras que, los beneficios de un sistema de contabilidad metalúrgica son:

- Monitoreo los indicadores técnicos, KPI.
- Disminución de la variabilidad de la producción y pérdidas de productos no contabilizados.
- Mejor flujo de información a la gerencia de planta e inversionistas.
- Mejor capacidad de solución en el proceso metalúrgico.
- Mayor precisión de la eficiencia del proceso.
- Confiabilidad en la toma de decisiones para modificaciones en diseño y diagrama del proceso.

En el estudio realizado por Outotec – Gold Fields (2015), “Sampling audit & upgrade recommendation report” [11], realizaron un estudio en campo en la operación planta de Cerro Corona, con el fin de evaluar el sistema de muestreo en Cerro Corona, cuya conclusión era que el esquema de muestreo de compósitos metalúrgicos empleado para los reportes de balance tienen la posibilidad y deben ser mejorados, para aumentar así el nivel de confianza de los resultados. Entre las ineficiencias significativas que impactan negativamente la confiabilidad de los resultados era el sub dimensionamiento y las malas condiciones mecánicas de los muestreadores en las principales corrientes de pulpa que son empleadas en el sistema de contabilidad. Además, en el estudio se muestra que estos errores, producidos por el ineficiente muestreo, son propagados produciendo un error relativo en la recuperación alrededor del 6%.

### **1.5.3 Ámbitos Locales**

En el estudio de investigación de Alcalá, L.; et al (2017), “Elaboración de Nomogramas de Muestreo usando la Teoría de Pierre GY” [1], describe que la necesidad de tener un muestreo representativo para obtener resultados consistentes y así tener una adecuada toma de decisiones, llevó a Pierre Gy, en 1949, estudiar, caracterizar y cuantificar los errores que son incurridos en el procedimiento de muestreo desde la etapa de toma o extracción de muestra in situ, división de muestra, hasta el tratamiento y ensayo químico para finalmente estimar el error total propagado en cada etapa. Este estudio fue desarrollándose a lo largo de años, alcanzando la Teoría Moderna del Muestreo, donde se define a los errores más importantes en la cadena del muestreo y estos son: Error fundamental, error de segregación y agrupamiento, error de delimitación del incremento, error de extracción, error de preparación, error analítico, error de ponderación y error de interpolación; los cuales al ser identificados y cuantificados en el proceso de muestreo se propagan hasta estimar el error total de muestreo, donde finalmente se deberá replantear el protocolo de muestreo establecido deberá tener el objetivo de minimizar este error para así tener una mejor precisión y exactitud de los resultados.

## **CAPÍTULO II**

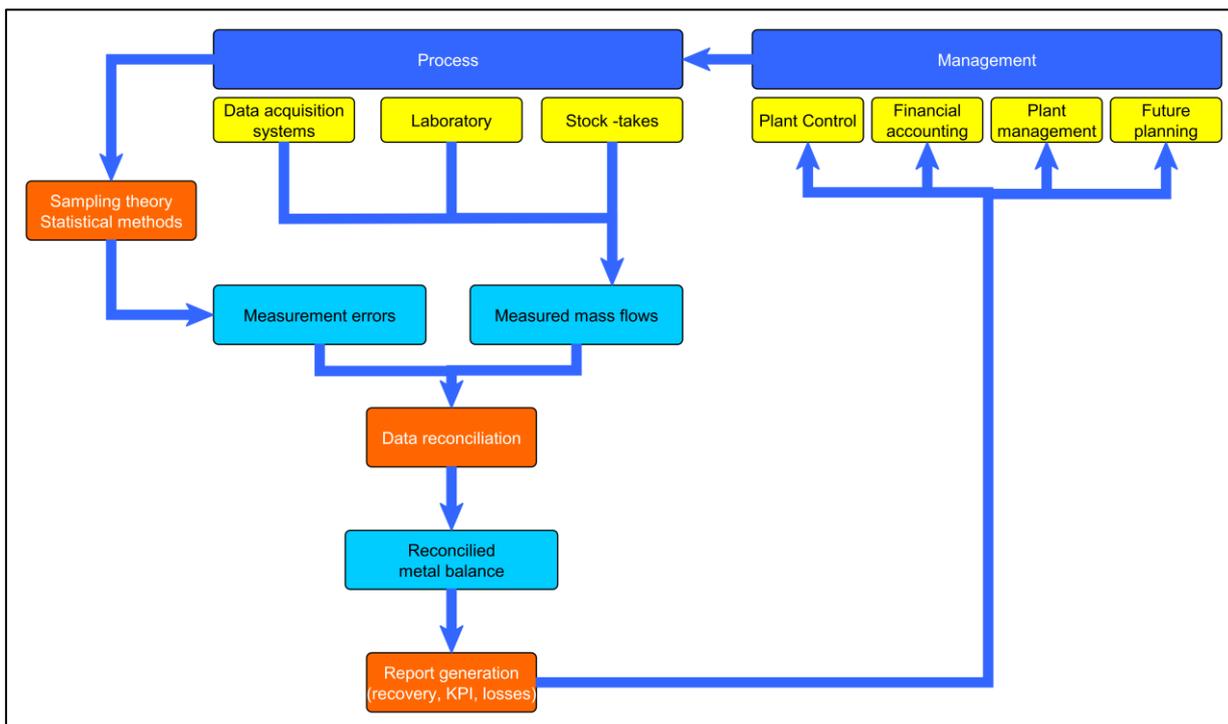
### **MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL**

#### **2.1 Marco Teórico**

##### **2.1.1 Contabilidad Metalúrgica**

Morrison, R. (2007), “AMIRA Project P754 - Metal Accounting and Reconciliation”, define que, en la gestión financiera de las industrias mineras, la herramienta principal es la contabilidad metalúrgica, esta es la estimación de la cantidad de metales producidos por una operación minera durante un periodo de tiempo definido. Este código de prácticas define las mejores prácticas a considerar en una contabilidad de metales, es a través de la gestión de las incertidumbres del proceso que se tiende a reducir el riesgo financiero.

Por lo tanto, un sistema de contabilidad es eficiente cuando la comprensión de la información es clara y precisa de la operación del proceso, partiendo desde un sistema preciso de muestreo y medición, para después realizar una reconciliación consistente de datos y resultados que después deben ser reportados, a través de un manejo de información simple y segura, a las personas interesadas tales como al área de gerencia, vicepresidencia, área de financiera, etc; a esta cadena de valor cerrada se denomina el ciclo de vida del sistema de contabilidad, tal como se muestra en la Figura 2.1.



**Figura 2.1.** Ciclo de vida de la contabilidad metalúrgica

Fuente. Caspeo (2020), “Contabilidad metalúrgica - Principios del código AMIRA”

Debido a que el sistema de contabilidad metalúrgica debe estimar con la mayor precisión posible el inventario de metales, entonces se diseña para:

- Mejorar la toma de decisiones,
- Mejorar la auditabilidad y transparencia.
- Optimizar la eficiencia general de la planta y la rentabilidad de la mina al producto.
- Aumentar la medición del rendimiento y minimizar el riesgo.

Morrison R., et al, (2008), “An Introduction to Metal Balancing and Reconciliation” [8], menciona que las industrias mineras son bastantes similares que el depósito de mineral pasa a través de una serie de etapas o cadena de transferencia típica hasta la obtención del metal, esta cadena de transferencia típica se muestra en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1.** Cadena de custodia típica entre una fuente de mineral y metal producto

<b>Área</b>	<b>Proceso</b>	<b>Base de Medición</b>
Mina	Reserva de Mineral	Modelo geológico/Disposición de taladros.
	Procesos mina	Número de camiones. Truck Factor. Modelo de bloque con ensayos químicos,
Cadena de custodia de Concentradora	Stockpile de alimentación.	Muestras ocasionales
	Etapas de conminución y separación: Relaves Concentrados.	Muestras y ensayos. Flujo de masa. Densidad. Muestras para ensayos químicos y humedad
Cadena de custodia de transporte	Carga/ Envío de concentrados	Balanzas certificadas. Muestras para humedad, ensayos químicos, granulometría, etc
Cadena de custodia de fundición	Concentrado recibido	Balanzas certificadas. Muestras para humedad, ensayos químicos, granulometría, etc.
	Residuos	Peso, muestras para ensayos químicos
	Solución de rechazos	Flujo, muestras para ensayos químicos
	Escorias	Peso, muestras para ensayos químicos
Cadena de custodia de venta de producto/ Clientes	Metal	Balanzas certificadas. Muestras para humedad, ensayos químicos, granulometría, etc.

Fuente: Morrison R. (2008). "An Introduction to Metal Balancing and Reconciliation"

De la anterior tabla, el trabajo de investigación se fundamentará en un estudio dentro de la cadena de custodia de una concentradora.

## 2.1.2 Teoría de Muestreo - TOS

En esta sección, se desarrollará una introducción a la teoría de muestreo desarrollada por Piere Gy, siendo extendida y llevada a la práctica por Francis Pitard y Dominique Francois Bongarcon, que permiten clasificar y cuantificar la magnitud del error que se comenten en las etapas de un protocolo de muestreo.

### 2.1.2.1 Generalidades del muestreo

Pitard F., (1993), “Pierre Gy’s Sampling Theory and Sampling Practice” [12], menciona que un muestreo adecuado es la clave para minimizar el error de muestreo y el sesgo, por ello, debe cumplir adecuadamente la definición inicial de muestreo que es “El muestreo debe ser equiprobable”.

Morrison R., (2008), “An Introduction to Metal Balancing and Reconciliation” [9], menciona que el error que se comete proviene de dos fuentes y estas son:

- Las propiedades intrínsecas del material
- La toma y preparación de muestras

### 2.1.2.2 Componentes de un error de muestreo

Morrison R., (2008), “An Introduction to Metal Balancing and Reconciliation” [9], por lo tanto, una comprensión de las fuentes de error dentro de la toma y preparación de muestras es importante para así identificar aquel o aquellos de mayor impacto para su reducción en cada etapa del proceso, como se describe en la Figura 2.2, el error global (GEE) es estimado por:

$$GEE = TSE + TAE \quad (1)$$

Donde:

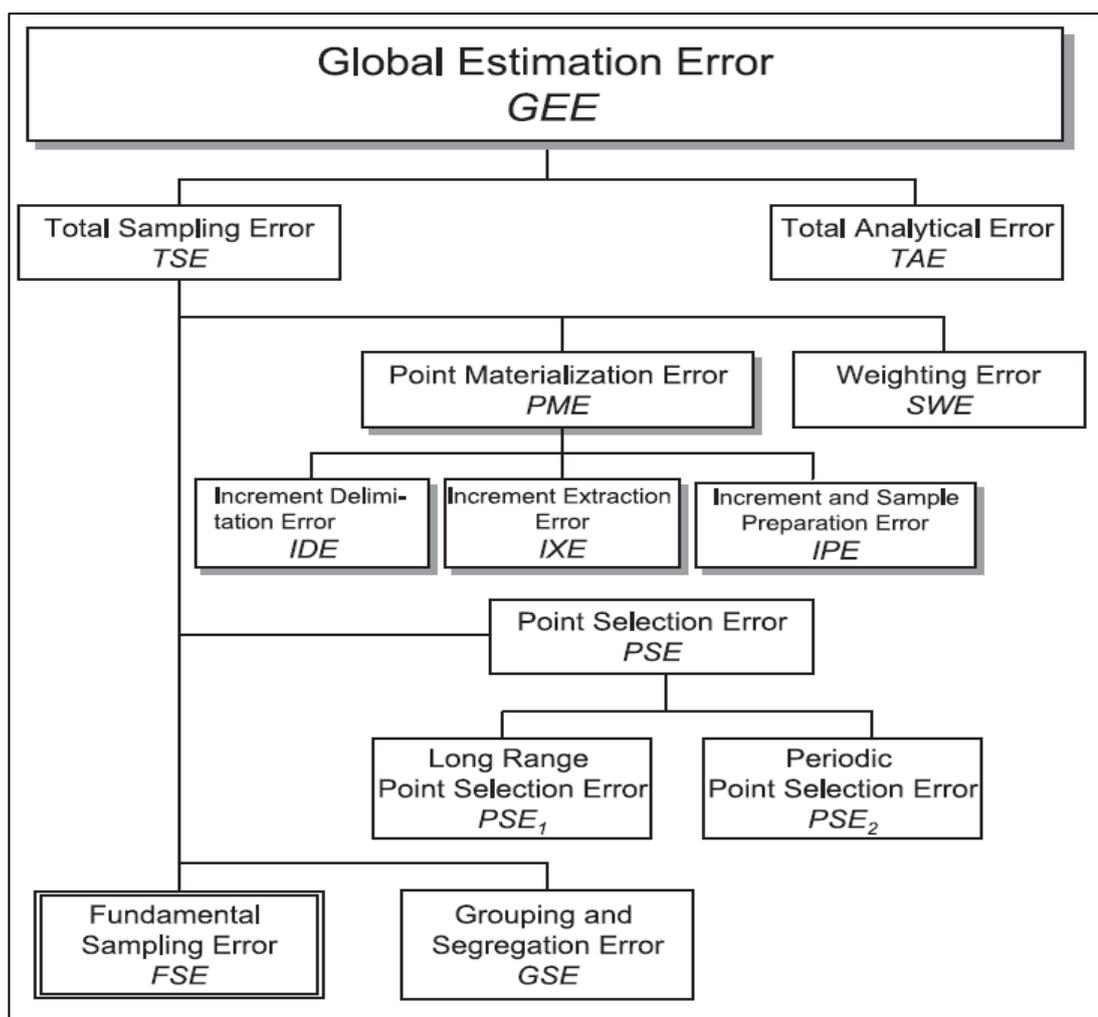
- TSE: Error total de muestreo
- TAE: Error total analítico

Descomponiendo el error total del muestreo en sus componentes según su fuente:

$$TSE = FSE + GSE + PSE_1 + PSE_2 + SWE + IDE + IXE + IPE \quad (2)$$

Donde:

- FSE: Error fundamental
- GSE: Error de agrupamiento y segregación
- PSE1: Error de selección de periodo largo
- PSE2: Error de fluctuación periódica de la calidad
- SWE: Error de ponderación
- IDE: Error de delimitación
- IXE: Error de extracción de incremento
- IPE: Error de preparación



**Figura 2.2.** Clasificación de errores de Gy según su origen.

Fuente. Minkinen (2004), "Practical applications of sampling theory"

### 2.1.3 Propagación de Errores

Napier T., et al, (2020), “Statistical Methods for Mineral Engineers” [10], menciona que, en las operaciones diarias se realizan múltiples mediciones y además se calculan otras a partir de las mediciones; tales como, la recuperación en base a las mediciones de leyes, concentración de sólidos en base a mediciones de los pesos de pulpa y sólidos, etc.

Como ya describió en el capítulo anterior, toda medición tiene un error, y aquellas mediciones que son calculadas, de otras mediciones base también, poseen un error y este error es el producto de la propagación de los errores de las mediciones base.

Los errores se propagan incluso en los cálculos más sencillos, tales como una simple adición o diferencia de dos mediciones, por ejemplo: si se tuviera dos muestras de peso de 5 kg y 10 kg, los cuales deben pesarse en una balanza con precisión de 0.1 kg; la suma de las dos muestras es 15 kg con una incertidumbre de  $0.1 + 0.1 = 0.2$  kg. Análogamente, si extraemos 5 kg de la muestra de 10kg, obtendremos una muestra de  $10 - 5 = 5$  kg con una incertidumbre de  $0.1 + 0.1 = 0.2$  kg, esto es  $5 \text{ kg} \pm 0.2 \text{ kg}$ . Lamentablemente, los errores o incertidumbres se incrementan, nunca disminuyen.

Entonces, la incertidumbre es expresado como la precisión con la cual uno lee una medición y estos ser medidos a través de las varianzas de las propias mediciones.

La incertidumbre es una estimación del posible error en la medición, así es la estimación del rango de valores que contiene el valor verdadero de la medición. De esta manera, el error es expresado mediante la varianza de esta. Siendo la varianza definida como el cuadrado de la desviación estándar.

Por lo tanto, una medición es expresada como:

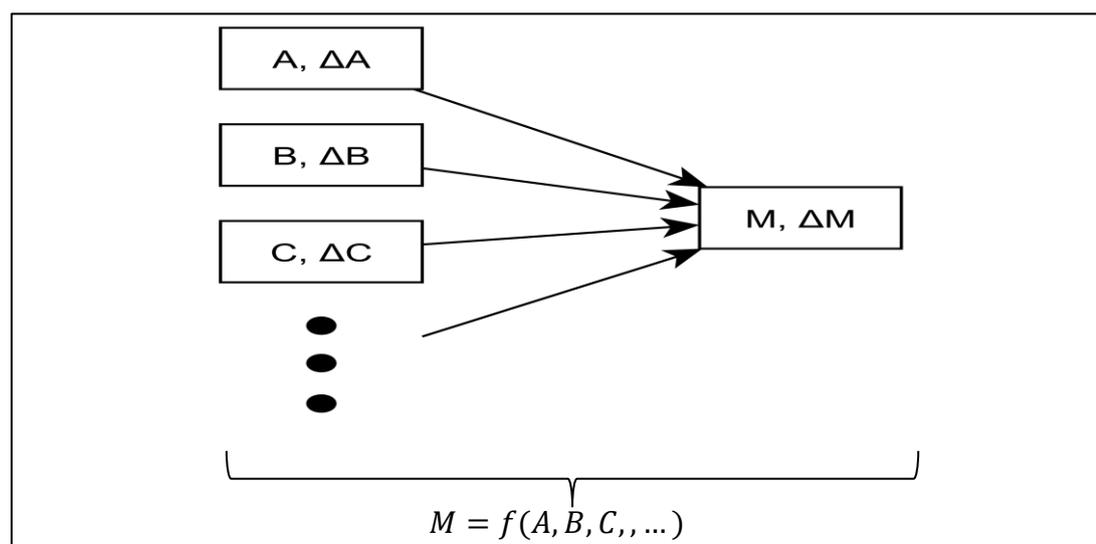
$$\bar{X} \pm \Delta X \quad (3)$$

Dónde:

- $\bar{X}$  : Valor medio de la medición
- $\Delta X$ : Error o incertidumbre de la medición,  $\approx 2\sigma = 2\sqrt{\sigma^2}$
- $\sigma^2$ : Varianza de la medición.

La estimación de la incertidumbre en la recuperación es estimada a través de las varianzas de sus componentes, ensayos químicos, por medio de la teoría de Propagación del Error, plantea que:

- Se cuantifica la incertidumbre de una cantidad estimada por medio de las diferentes fuentes de incertidumbres de las mediciones que componen.
- Así, la varianza de una cantidad estimada es función de las varianzas de los componentes de esta.
- En general, en la Figura 2.3 muestra a una medición, M, que depende de varias mediciones experimentales, A, B, C, etc. Con sus respectivas incertidumbres de cada medición.



**Figura 2.3.** Propagación de incertidumbre para una medición.

Fuente: Elaboración propia

Para estimar la incertidumbre de  $M$ , se da por la ecuación general:

$$\sigma_M^2 = \left(\frac{\partial M}{\partial A}\right)^2 \sigma_A^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial B}\right)^2 \sigma_B^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial C}\right)^2 \sigma_C^2 + \dots \quad (4)$$

Dónde:

- $\sigma_i$  : Desviación estándar de la medición  $i$ .
- $\frac{\partial M}{\partial i}$ : Diferencias parciales de  $M$  con respecto a cada componente  $i$ .
- $\sigma_M$ : Desviación estándar de la cantidad estimada  $M$ .

## 2.2 Marco Conceptual

- **Ajuste**

Los cambios o variaciones aplicadas en las mediciones para lograr un balance consistente y exacto; esto es, que cumpla que la cantidad másica total que ingresa al proceso, sea la misma que el total de las salidas del proceso.

- **Análisis**

Es la concentración de un material con respecto a un lote, determinado por ensayos químicos.

- **Concentrado**

Es el producto de una operación de procesamiento de minerales, el cual contiene un alto grado de concentración del mineral valioso y baja concentración de metales no-valiosos.

- **Incremento**

Una cantidad de material colectado en una simple operación del lote a través de un equipo de muestreo.

- **Lote**

Grupo total de elementos sobre el que se desea extraer las muestras para poder ser observadas y caracterizadas.

- **Muestra**

Es una parte del lote, generalmente obtenida por la unión de varios incrementos del lote, y cuyo objetivo es representar el lote. Sin embargo, una muestra no es cualquier parte del lote, pues su extracción debe respetar las reglas que la teoría de muestreo establece. Su extracción debe ser equiprobabilística.

- **Precisión**

Se dice que una medida es precisa, cuando está libre de sesgos y con una dispersión baja; esto es, que un conjunto de los resultados de mediciones está concentrado en el valor promedio.

- **Protocolo**

En teoría de muestreo, es el conjunto de pasos y operaciones de toma de muestras y preparación cuyo objetivo es minimizar errores y entregar una muestra bajo ciertos estándares de control.

- **Recuperación**

Es la suma de contenido metálico en la salida de un proceso, o parte de esta, dividido entre la suma de todos los contenidos metálicos de todos los alimentos al proceso, expresado en porcentaje

- **Sesgo**

Es la diferencia entre el verdadero valor de una medición y el resultado promedio de un conjunto de mediciones de una medida

## **CAPÍTULO III**

### **DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

#### **3.1 Proceso General**

##### **3.1.1 Unidad de Análisis**

La unidad de análisis en la presente investigación corresponderá a la unidad minera Orcopampa de la Cía. de Mina Buenaventura (BVN) es una operación subterránea de oro y plata que se ubica en el distrito de Orcopampa, provincia de Castilla, región Arequipa y comprende dos microcuencas: Orcopampa, donde se ubica la planta de beneficio y los depósitos de relaves; y Chilcaymarca, donde se ubican las operaciones (Chipmo). Esto aproximadamente está a 1,350 kilómetros al sureste de la ciudad de Lima a una altura entre 3,800 y 4,500 m.s.n.m. Esto se muestra en la Figura 3.1.

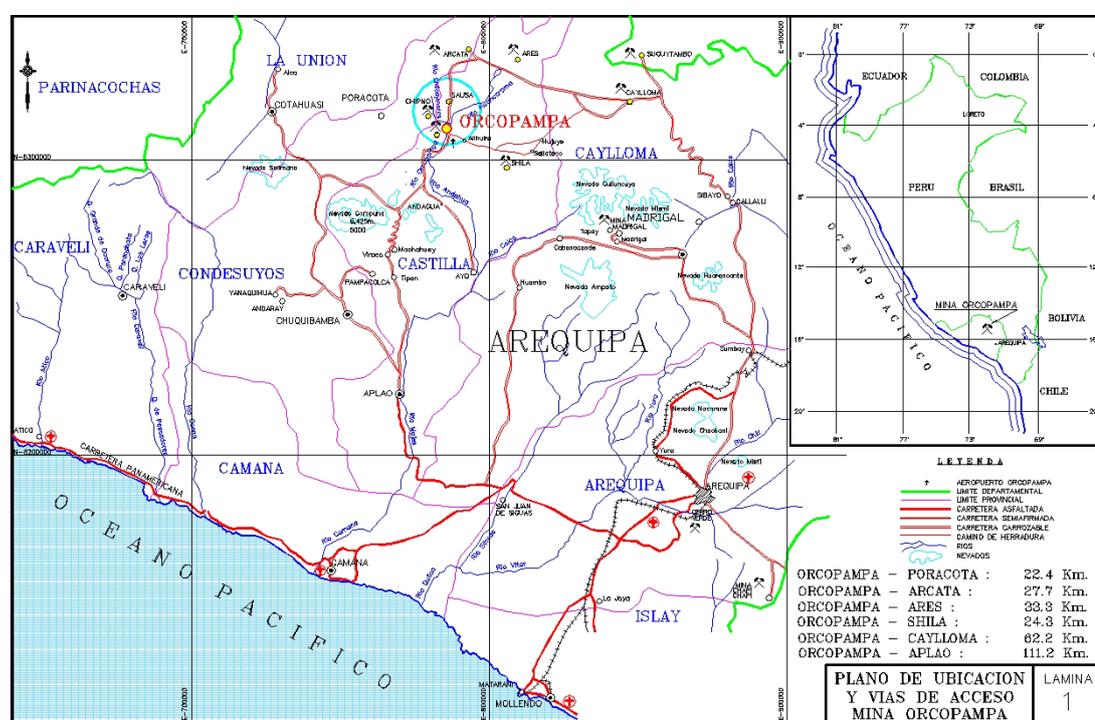
La ubicación geográfica UTM (WGS 84) Zona 18 corresponde a las siguientes coordenadas:

- Norte: 8 310 050 – 8 310 200
- Este: 787 050 – 786 850

El acceso al distrito de Orcopampa se puede realizar por vías terrestre o aérea.

- Por carretera se tienen tres accesos:
  - Arequipa – Aplao – Chuquibamba – Orcopampa: 370 km
  - Una segunda ruta, pero menos transitada, es Arequipa – Sibayo por la carretera Arequipa – Aplao – Viraco – Orcopampa

- Caylloma – desvío Mina Arcata – Orcopampa: 320 km.
- Por vía aérea:
  - Utilizando el aeropuerto de Orcopampa, se tiene servicio de avionetas tres veces al mes: Lima – Orcopampa – Arequipa – Lima; (Lima – Orcopampa = 1.5 horas), (Orcopampa – Arequipa = 20'), (Arequipa – Lima = 1h,50').



**Figura 3.1.** Ubicación de unidad minera Orcopampa – BVN

Fuente. Cía mina Buenaventura (2007), “Orcopampa, Desarrollo Regional Sostenible”

### 3.1.2 Descripción del Proceso General

En la planta de procesos como unidad de análisis procesa en 03 guardias un promedio de 1,500 t/d de mineral aurífero con ley de cabeza promedio 10.0 g Au/t y 15.6 g Ag/t y sus productos finales son barras doré y concentrado de flotación bulk de Au y Ag; además, cuenta con las operaciones de chancado, molienda, gravimetría, cianuración CIP, flotación, desorción-electrodeposición, Merrill Crowe y fundición.



### 3.1.3 Mediciones Experimentales del Proceso

En la Figura 3.2 se presentó a los diversos flujos que componen el proceso, para los análisis en esta investigación se estimó las mediciones promedio de las diversas componentes (flujo másico, leyes, humedad, densidad y concentración de sólidos); este análisis se analizó de la base de datos de producción por guardia y se muestra en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1.** Mediciones experimentales de principales flujos del proceso

Etapa	Componente	Unidad	Guardia 1	Guardia 2	Guardia 3
Alimento General	Tonelaje	t/d	535	526	537
	Humedad	%	5.77	5.64	5.41
	Ley Au	g/t	9.32	8.95	9.37
	Ley Ag	g/t	15.0	16.3	14.7
Concentrado Gravimétrico	Tonelaje	t/d	0.44	0.43	0.44
	Humedad	%	9.92	11.6	11.6
	Ley Au	g/t	2,686	2,498	2,897
	Ley Ag	g/t	1,223	1,387	1,299
Alimento lixiviación	Ley Au	g/t	7.2	7.0	7.2
	Ley Ag	g/t	14.1	15.3	13.7
Cabeza de Flotación	Ley Au en sólido	g/t	0.46	0.45	0.46
	Ley Ag en sólido	g/t	4.69	4.68	4.34
	Ley Au en solución	g/t	0.029	0.032	0.032
	Ley Ag en solución	g/t	1.17	1.18	1.19
	Densidad de Pulpa en alimento	t/m <sup>3</sup>	1,418	1,418	1,418
	Flujo Alimentación	m <sup>3</sup> /h	750	750	738
	%Sólidos en la alimentación	%	47.4%	47.4%	47.4%
Concentrado flotación	Ley Au	g/t	58.5	61.4	56.1
	Ley Ag	g/t	863	821	813
Relave de Flotación	Ley Au en sólido	g/t	0.25	0.25	0.26
	Ley Ag en sólido	g/t	2.43	2.18	2.52
	Ley Au en solución	g/t	0.029	0.032	0.032
	Ley Ag en solución	g/t	1.17	1.17	1.19

Fuente: Elaboración propia

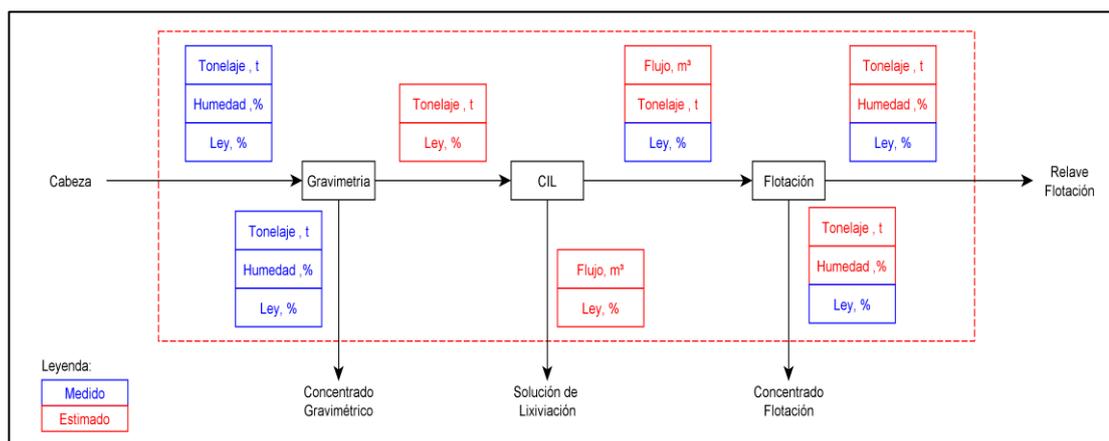
### 3.2 Sistema de Contabilidad Inicial

En esta sección se analizará el sistema de contabilidad inicial en el proceso, específicamente para la estimación de la recuperación y producción de finos.

#### 3.2.1 Metodología

El sistema de contabilidad del proceso metalúrgico consta de la estimación de la producción de finos y de las recuperaciones de los metales valiosos.

En el siguiente diagrama se muestra los puntos y mediciones propuestas para que se incluyan en el balance diario, y así poder estimar la recuperación y producción del circuito.



**Figura 3.3.** Esquema resumido del proceso inicial

Fuente: Elaboración propia

Describiendo el sistema de contabilidad inicial y las mediciones que lo involucran:

- ***Contenido de finos en la cabeza:*** Las mediciones realizadas son del tonelaje, humedad y leyes del mineral; estos dos últimos son medidos en una muestra representativa que es extraída de un cortador automático; mientras que el peso es medido empleando un pesómetro. Donde, las mediciones de la humedad y ensayos químicos en la muestra representativa tienen baja precisión debido a: La dificultad para extraer una muestra representativa para el material con ese tamaño de

partícula y a los problemas causados por el cortador en este punto (ver Anexo N° 3 con presentación del estado de los cortadores).

- **Recuperación y producción en gravimetría:** Durante la descarga de concentrado, el flujo de alimentación pasa directamente a alimentación de lixiviación. Por lo tanto, la recuperación y producción de esta sección es estimada de las mediciones de la alimentación y concentrado gravimétrico.
- **Recuperación y producción en lixiviación:** Son estimadas a partir de la diferencia de contenidos metálicos del alimento y relave, por lo tanto, el contenido de finos en el alimento de esta sección es el relave de la sección gravimétrica. Se describe que los cortadores inadecuados o de diseño pobre en el relave de lixiviación afectan en la extracción de muestras representativas y causa el aumento de la incertidumbre de las mediciones y resultados (Ver Anexo N° 3).
- **Recuperación y producción en flotación:** El tonelaje de alimentación es equivalente al tonelaje de alimentación a lixiviación y a partir de las leyes de Au del alimento y productos se estima el corte de masa al relave. Entonces, las incertidumbres de los targets son dependientes de las precisiones de las mediciones de las leyes, por lo que un mal diseño de cortador impacta en la incertidumbre de producción y recuperación de esta sección y de acuerdo a la descripción de los cortadores (Anexo N° 3) se describe que existen dificultades en los cortadores principalmente en el relave de flotación.

### 3.2.2 Estimación de la Recuperación y Producción

Basándonos en el esquema de la Figura 3.3, el método utilizado en la estimación de la recuperación y la producción diaria es contabilizada por 3 procesos de extracción de Au, Gravimetría – Lixiviación – Flotación.

Para la estimación de la producción de Au o Ag en el sistema de contabilidad, se tienen las siguientes ecuaciones:

$$C.M_{Alim.General} = Ton_{Alim.General} \left( 1 - \frac{\%H_{Alim.General}}{100} \right) Ley_{Alim.General} \quad (5)$$

$$C.M_{Conc.Grav.} = Ton_{Conc.Grav.} \left( 1 - \frac{\%H_{Conc.Grav.}}{100} \right) Ley_{Conc.Grav.} \quad (6)$$

$$Ton_{Cab.Flot.} = (Ton_{Alimento} - Ton_{Conc.Grav.}) \quad (7)$$

$$Ton_{Rlve} = (Ton_{Alimento} - Ton_{Conc.Grav.}) * RC_{Rlve} \quad (8)$$

$$RC_{Rlve} = \frac{Ley_{Conc.Flot.Solid} - Ley_{Cab.Flot.Solid}}{Ley_{Conc.Flot.Solid} - Ley_{Rel.Flot.Solid}} \quad (9)$$

$$C.M_{Cab.Flot.} = Ton_{Cab.Flot.} * Ley_{Cab.Flot.Solid} + Ley_{Cab.Flot.liquid} * Ton_{Cab.Flot.} * \frac{(1-\%S)}{\%S} \quad (10)$$

$$C.M_{Rel.Flot.} = Ton_{Rlve} * Ley_{Rlve.Flot.Solid} + Ley_{Rlve.Flot.liquid} * Ton_{Rel.Flot.} * \frac{(1-\%S)}{\%S} \quad (11)$$

Dónde:

- $C.M_{Alim.General}$  : Contenido metálico Alimento General
- $C.M_{Conc.Grav}$  : Contenido metálico en Concentrado Gravimétrico
- $C.M_{Cab.Flot}$  : Contenido metálico en Cabeza Flotación
- $C.M_{Rel.Flot}$  : Contenido metálico en Relave Flotación
- $Ton_{Alim.General}$  : Tonelaje alimento

- $Ton_{Conc Grav}$  : Tonelaje concentrado gravimétrico
- $Ton_{Cab Flot}$  : Tonelaje cabeza de flotación
- $Ton_{Rlve}$  : Tonelaje relave
- $Ley_{Cab Flot Solid}$  : Ley de cabeza de flotación de sólido
- $Ley_{Cab Flot liquid}$  : Ley de cabeza de flotación de líquido
- $Ley_{Rlve Flot Solid}$  : Ley de relave de flotación de sólido
- $Ley_{Rlve Flot liquid}$  : Ley de relave de flotación de líquido
- $Ley_{Conc Flot Solid}$  : Ley de concentrado de flotación de sólido
- $\%S$  : Porcentaje de sólidos en la flotación
- $RC_{Rlve}$  : Ratio de concentración al relave

Para la estimación de las recuperaciones en cada sección y el total, se tiene las siguientes ecuaciones:

$$\%Rec_{Grav.} = \frac{C.M. \cdot Conc.Grav.}{C.M. \cdot Alim.General} * 100\% \quad (12)$$

$$\%Rec_{Lixiviación} = \frac{C.M. \cdot Alim.General - C.M. \cdot Conc.Grav. - C.M. \cdot Cab.Flot.}{C.M. \cdot Alim.General} * 100\% \quad (13)$$

$$\%Rec_{Flotación} = \frac{C.M. \cdot Cab.Flot. - C.M. \cdot Rel.Flot.}{C.M. \cdot Alim.General} 100\% \quad (14)$$

Dónde:

- $Rec_{Grav}$  : Recuperación Gravimétrica
- $Rec_{Lixiviación}$  : Recuperación Lixiviación
- $Rec_{Flotación}$  : Recuperación Flotación

### 3.2.3 Caso Práctico: Incertidumbre en la Recuperación Gravimétrica de Oro

La recuperación diaria de Au en la etapa de gravimetría es estimada por la acumulación de la producción por las 3 guardias, entonces:

$$C.M._{Conc.Grav.} = \sum_{i=1}^3 Ton_{Conc.Grav.} \left(1 - \frac{\%H_{Conc.Grav.}}{100}\right) Ley_{Conc.Grav.} \quad (15)$$

$$C.M._{Alim.General} = \sum_{i=1}^3 Ton_{Alim.General} \left(1 - \frac{\%H_{Alim.General}}{100}\right) Ley_{Alim.General} \quad (16)$$

Dónde:

- $\sum_{i=1}^3()$  : Representa a la sumatoria de las 3 guardias

Por lo tanto, (15) y (16) en (12):

$$\%Rec_{Grav.} = \frac{\sum_{i=1}^3 Ton_{Conc.Grav.} \left(1 - \frac{\%H_{Conc.Grav.}}{100}\right) Ley_{Conc.Grav.}}{\sum_{i=1}^3 Ton_{Alim.General} \left(1 - \frac{\%H_{Alim.General}}{100}\right) Ley_{Alim.General}} 100\% \quad (17)$$

Para este caso práctico asumimos valores de incertidumbres para cada medición experimental que componen a la estimación de la recuperación gravimétrica como se muestra en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2.** Precisión de las componentes de medición- Caso práctico

Flujo	Componente	Unidad	Valor	Incertidumbre de medición
Tonelaje de alimentación	Tonelaje	t/h	61.1	0.5%
	Humedad	%	5.61	2.0%
	Ley de Au	g/t	8.82	0.8%
Concentrado Gravimetría	Tonelaje	t/h	0.050	0.5%
	Humedad	%	11.6	1.0%
	Ley de Au	g/t	3,474	0.5%

Fuente: Elaboración propia

Aplicando la *Teoría de Propagación del Error* en esta medición, la incertidumbre en la estimación de la recuperación gravimétrica queda definida como se muestra en Anexo N° 5-*Recuperación Gravimétrica*. Por lo tanto, descomponiendo en sus términos de la ecuación, se tiene:

**Tabla 3.3.** Descomposición de términos de la incertidumbre

Componente	Diferenciales de $Rec_{Grav.}$ respecto a:	Aporte total a la incertidumbre
Tonelaje de Cabeza	$-100 * CM_{Conc.Grav.} * \frac{(100 - \%H_{Cabeza})}{100} * \frac{\%Ley_{Cabeza}}{CM_{Cabeza}^2}$	18.6%
Humedad Cabeza	$-100 * CM_{Conc.Grav.} * Ton_{Cabeza} * \frac{(-1)}{100} * \frac{\%Ley_{Cabeza}}{CM_{Cabeza}^2}$	1.0%
Ley Cabeza	$-100 * CM_{Conc.Grav.} * \frac{(100 - \%H_{Cabeza})}{100} * \frac{Ton_{Cabeza}}{CM_{Cabeza}^2}$	41.8%
Tonelaje de Gravimetría	$100 * \frac{(100 - \%H_{Gravimetria})}{100} * \frac{Ley_{Gravimetria}}{CM_{Cabeza}}$	18.6%
Humedad Gravimetría	$-1 * Ton_{Cabeza} * \frac{Ley_{Gravimetria}}{CM_{Cabeza}}$	1.2%
Ley Gravimetría	$100 * \frac{(100 - \%H_{Gravimetria})}{100} * \frac{Ton_{Cabeza}}{CM_{Cabeza}}$	18.6%

Fuente: Elaboración propia

Reemplazando en la ecuación de la incertidumbre de la recuperación, se tiene:

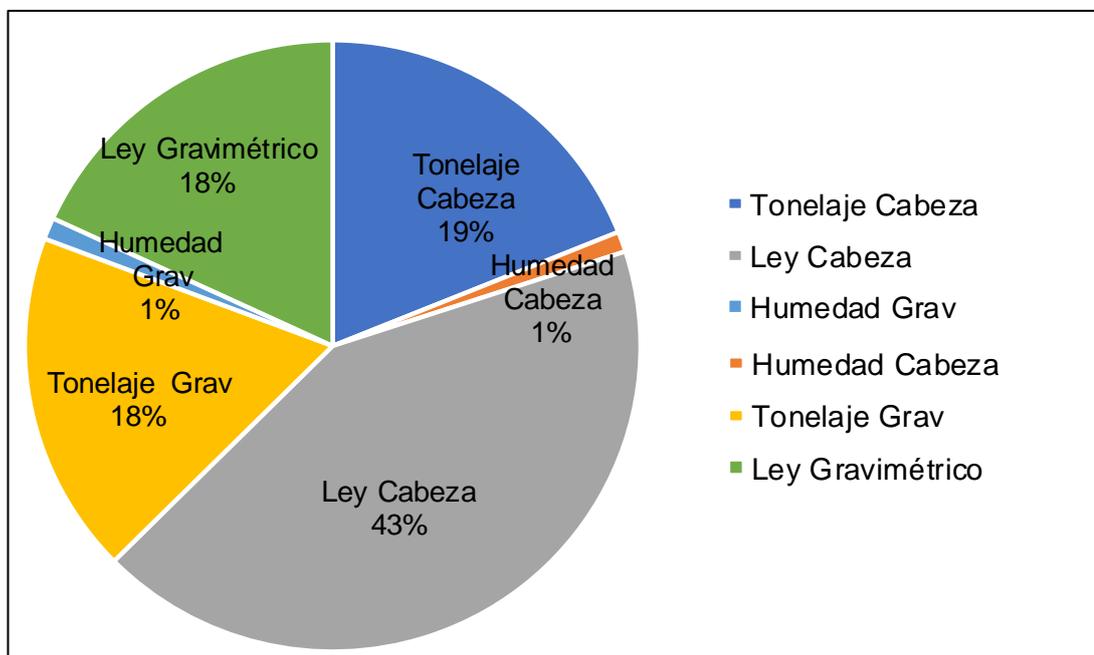
$$\sigma_{Rec_{Grav}}^2 = 0.037$$

$$\sigma_{Rec_{Grav.}} = 0.194 \rightarrow \Delta Rec_{Grav.} = 2(0.194) = 0.38$$

Por lo tanto, la incertidumbre de la recuperación de gravimetría es:

$$Rec_{Grav.} = (29 \pm 0.38)\% \approx [29.4\% ; 28.6\%]$$

Además, en la Figura 3.4 muestra a cada medición con su respectivo aporte de error o incertidumbre en la estimación de la incertidumbre de la recuperación gravimétrica.



**Figura 3.4.** Distribución de incertidumbre de gravimetría – Caso práctico

Fuente: Elaboración propia

De la *Figura 3.4*, con respecto a la incertidumbre en la recuperación gravimétrica:

- La medición del tonelaje, ensayos químicos en la cabeza y concentrados son quienes aportan mayor incertidumbre en la estimación de la recuperación de Au gravimétrico. Donde, la componente que aporta mayor incertidumbre es la ley de cabeza, alrededor del 43%.
- Mientras que, las mediciones de humedades no atribuyen un error significativo.

### 3.2.4 Estimación de las Incertidumbres de Recuperación y Producción de Finos

Para fines de identificar en orden de magnitud la confiabilidad del valor de recuperación y producción estimado, se ha elaborado tres escenarios y un caso general en los cuales se han asumido las magnitudes de estos errores o incertidumbres de medición para cada componente (flujo o ensayo) en base a la siguiente asignación de

casos: teórico, aceptable y crítico, que indicarán las precisiones de medición de cada componente.

En la Tabla 3.4, Tabla 3.5 y Tabla 3.6 se presenta las precisiones para cada caso que describen al:

- **Caso teórico:** las precisiones son similares a recomendaciones estándares; donde los protocolos, metodologías de muestreo, equipos de mediciones óptimos son adecuados para las mediciones y estas son validadas.
- **Caso normal:** precisiones de acuerdo con protocolos evaluados y donde el proceso se encuentra en un proceso controlable. Valores de estas precisiones son consideradas de acuerdo con operaciones similares de producción.
- **Caso crítico:** equipos inadecuados, protocolos no validados de muestreos y mediciones.
- Los valores de precisiones para cada caso son asumidos. Se recomienda analizar precisiones de cada componente para un análisis consistente.

**Tabla 3.4.** Precisión de las mediciones en el alimento general – Método inicial

Sección	Componente	RSD, Caso		
		Teórico	Normal	Crítico
Cabeza general	Tonelaje, t/d	0.5%	2.0%	5.0%
	Humedad, %	2.0%	5.0%	10.0%
	Ley Au, g/t	0.8%	2.5%	5.0%
	Ley Ag, g/t	1.0%	2.5%	8.0%

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.5.** Precisión de las mediciones en gravimetría– Método inicial

Sección	Componente	RSD, Caso		
		Teórico	Normal	Crítico
Gravimetría	Tonelaje del concentrado, t/d	0.5%	1.0%	5.0%
	Humedad del concentrado, %	1.0%	2.5%	7.5%
	Ley Au del concentrado, g/t	0.5%	1.0%	3.5%
	Ley Ag del concentrado, g/t	0.5%	1.5%	3.5%

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.6.** Precisión de las mediciones flotación – Método inicial

Sección	Componente	RSD, Caso		
		Teórico	Normal	Crítico
Flotación	Ley Au en cabeza - Sólidos, g/t	0.5%	2.5%	7.5%
	Ley Ag en cabeza - Sólidos, g/t	0.5%	2.5%	7.5%
	Ley Au en concentrado - Sólidos, g/t	1.5%	2.5%	7.0%
	Ley Ag en concentrado - Sólidos, g/t	1.5%	2.5%	7.0%
	Ley Au en Relave - Sólidos, g/t	2.0%	5.0%	10.0%
	Ley Ag en Relave - Sólidos, g/t	2.0%	5.0%	10.0%
	Ley Au solución, g/t	0.5%	2.5%	7.5%
	Ley Ag solución, g/t	0.5%	2.5%	7.5%
	Flujo de alimentación, m <sup>3</sup> /h	1.0%	2.5%	7.0%
	Concentración de sólidos de la pulpa, %	1.0%	2.0%	7.0%
	Densidad de Pulpa, t/m <sup>3</sup>	1.0%	2.0%	5.0%

Fuente: Elaboración propia

Análogamente al caso práctico de la sección anterior, se analizó las distribuciones de las incertidumbres en la recuperación y producción de finos en base a las mediciones presentadas anteriormente en la Tabla 3.1 y las incertidumbres de las tablas anteriores. En este análisis se aplicó la ecuación de propagación del error, ecuación (4), en las ecuaciones (12), (13) y (14); las ecuaciones resultantes se muestran en el Anexo N° 5. Por lo tanto, las incertidumbres de las recuperaciones y producción tanto de oro como plata para cada caso son:

**Tabla 3.7.** Incertidumbres en la recuperación de Au

Caso	Unid.	Gravimetría	Lixiviación	Flotación	Total
Recuperación media de Au	%	22.5	72.2	2.22	96.9
Teórica	%	± 0.30	± 0.75	± 0.07	± 1.10
Normal	%	± 0.90	± 2.58	± 0.22	± 3.76
Crítico	%	± 2.40	± 5.82	± 0.54	± 8.57

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.8.** Incertidumbres en la recuperación de Ag

Caso	Unid.	Gravimetría	Lixiviación	Flotación	Total
Recuperación media de Ag	%	6.51	55.2	14.4	76.1
Teórica	%	± 0.10	± 1.1	± 0.42	± 1.6
Normal	%	± 0.27	± 2.11	± 1.28	± 3.00
Crítico	%	± 0.83	± 6.25	± 3.34	± 8.88

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.9.** Incertidumbres en la producción de Au

Caso	Unid.	Gravimetría	Lixiviación	Flotación	Total
Produc. media de finos Au	g/d	3,123	10,028	308	13,459
Teórica	g/d	± 25	± 143	± 10	± 146
Normal	g/d	± 51	± 498	± 30	± 505
Crítico	g/d	± 219	± 1,110	± 75	± 1,127

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.10.** Incertidumbres en la producción de Ag

Caso	Unid.	Gravimetría	Lixiviación	Flotación	Total
Produc. media de finos Ag	g/d	1,509	12,794	3,327	17,630
Teórica	g/d	± 12.3	± 300	± 92	± 314
Normal	g/d	± 31.3	± 798	± 291	± 835
Crítico	g/d	± 106	± 2,402	± 737	± 2,437

Fuente: Elaboración propia

Mientras que, las incertidumbres de las recuperaciones totales y producción de finos de Au y Ag están distribuidas por el aporte de las incertidumbres de cada componente de medición. Las distribuciones de las incertidumbres de las recuperaciones y producción de finos se muestran en las Figura 3.5 y Figura 3.6 respectivamente.

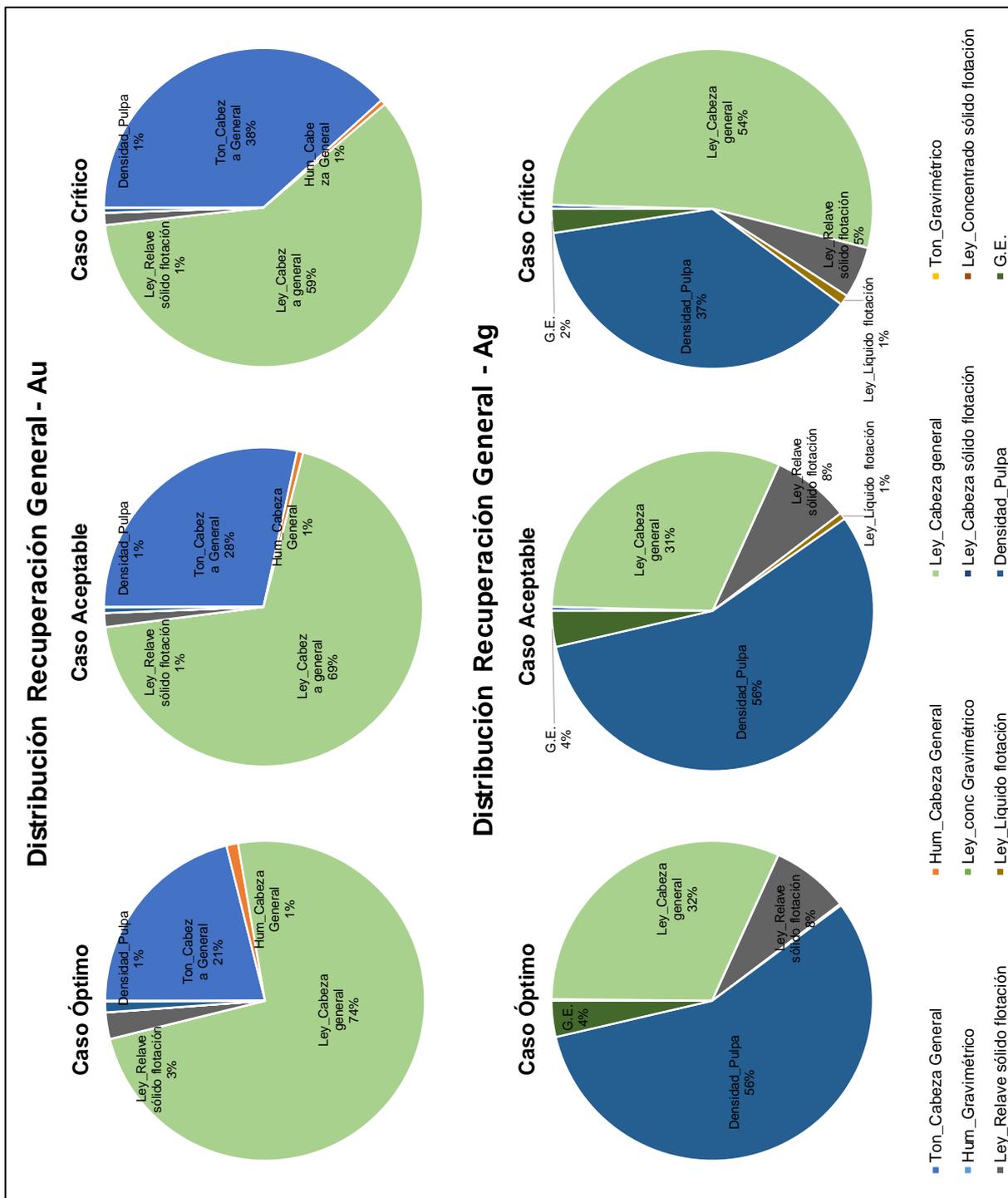


Figura 3.5. Distribución de las incertidumbres - Recuperación total de Au y Ag

Fuente: Elaboración propia

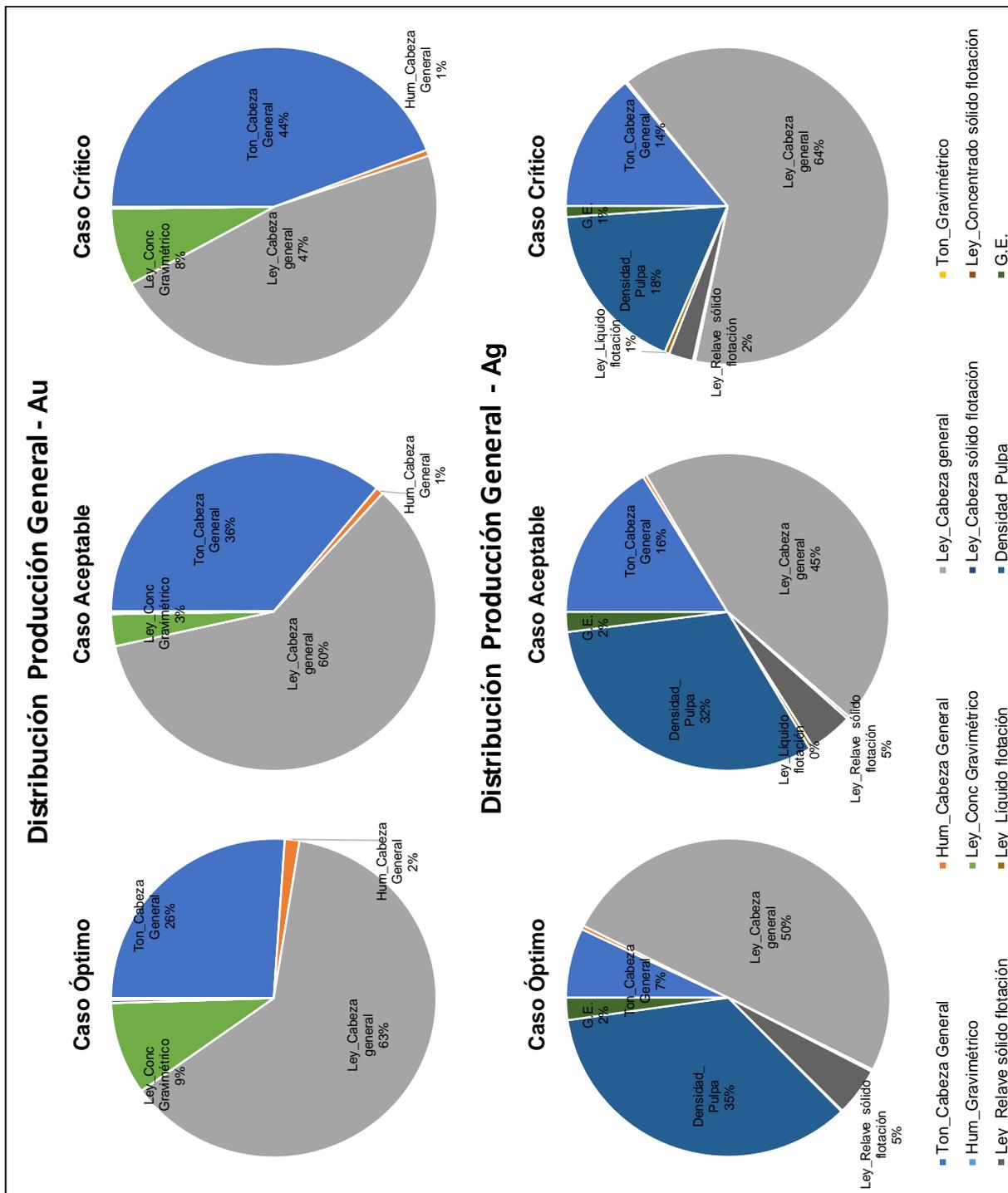


Figura 3.6. Distribución de las incertidumbres - Producción total de Au y Ag

Fuente: Elaboración propia

De la *Figura 3.5*:

- En la recuperación de Au: Las mediciones con mayor aportación son: Ley de cabeza general de Au, más del 60% de aportación de incertidumbre y el tonelaje de cabeza general.
- En la recuperación de Ag: Las mediciones con mayor aportación son la densidad de pulpa y la ley de cabeza general de Ag.
- Se recomienda un control adecuado y tener una adecuada precisión en las mediciones de tonelaje y la ley de cabeza de Au y Ag.

De la *Figura 3.6*:

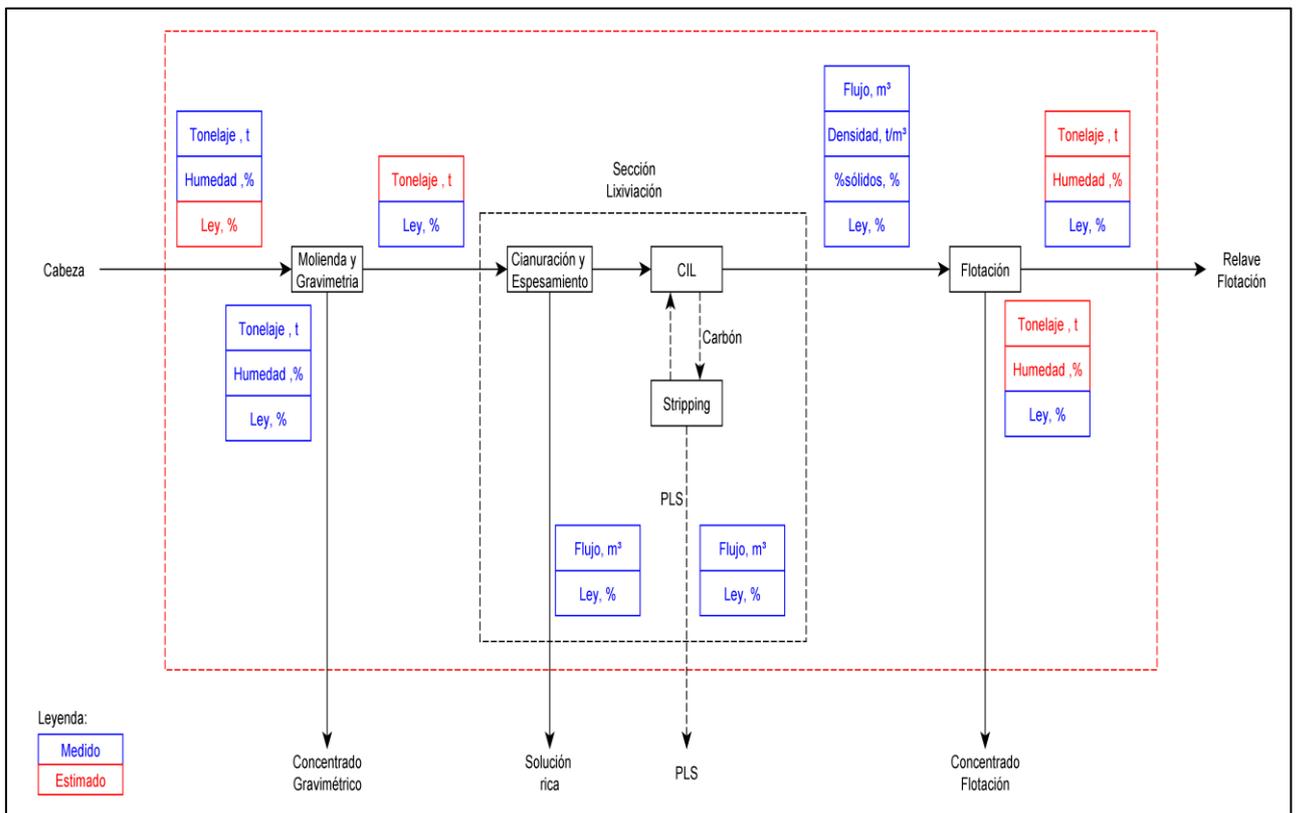
- Para la producción total de finos de Au: Las mediciones que aportan mayor incertidumbre en la producción son ley de cabeza general, tonelaje de cabeza general y ley de concentrado gravimétrico.
- Para la producción total de finos de Ag: Las mediciones que aportan mayor incertidumbre en la producción son la ley de cabeza general, tonelaje de cabeza general y densidad de pulpa

### 3.3 Sistema de Contabilidad Propuesto

En esta sección se propone una estimación de los targets en la contabilidad como alternativa, esto es con el objetivo de minimizar la incertidumbre generada por la metodología de estimación inicial.

#### 3.3.1 Metodología

En el siguiente esquema se muestra las mediciones para la estimación de los targets con el método propuesto.



**Figura 3.7.** Esquema con mediciones – Método alternativo

Fuente: Elaboración propia

Esta metodología propone una mejora en el diseño de los cortadores y se describe la metodología propuesta:

- **Contenido en el concentrado gravimétrico:** El contenido metálico está estimado a partir de las mediciones de leyes, tonelajes y humedad, estas son:

$$C.M._{Conc.Grav.} = Ton_{Conc.Grav.} \left( 1 - \frac{\%H_{Conc.Grav.}}{100} \right) Ley_{Conc.Grav.} \quad (18)$$

- **Contenido en el relave gravimétrico:** El contenido metálico está estimado a partir de las mediciones de leyes, diferencias de tonelaje y humedad, estas son:
- 

$$C.M._{Cab.Lix.} = \left( Ton_{Alim.General} \left( 1 - \frac{\%H_{Alim.General}}{100} \right) - Ton_{Conc.Grav.} \left( 1 - \frac{\%H_{Conc.Grav.}}{100} \right) \right) Ley_{Alim.Lixiv.} \quad (19)$$

- **Contenido en la cabeza:** Debido a la dificultad de obtener una muestra representativa de este punto, es preferente estimar la ley en este punto a través del cálculo del contenido metálico en los productos. Esto es:

$$C.M._{Alim.General} = C.M._{Conc.Grav.} + C.M._{Cab.Lix.} \quad (20)$$

- **Sección gravimetría:** La recuperación estará estimada a partir de las ecuaciones (18) y (20), entonces:

$$\%Rec_{Grav.} = \frac{C.M._{Conc.Grav.}}{C.M._{Alim.General}} * 100\% \quad (21)$$

- **Sección lixiviación:** En esta sección abarca las etapas de Cianuración-Espesamiento y CIL cuyos productos son una solución rica y PLS respectivamente. La instalación de un caudalímetro es requerida en la alimentación a flotación. Para la estimación de la eficiencia de esta sección se recomienda realizar mediciones en la pulpa del alimento al circuito de flotación como el Flujo o caudal de pulpa (m<sup>3</sup>/h), la densidad de pulpa (t/m<sup>3</sup>), la concentración de sólidos (%) y la ley en sólidos y en solución de Au y Ag (g/t). Por lo tanto, la eficiencia en esta sección se estima por la diferencia del contenido en el alimento y el relave:

$$Ton_{Cab.Flot.} = F * \%S * \rho \quad (22)$$

$$C.M._{Cab.Flot.} = Ton_{Cab.Flot.} * Ley_{Cab.Flot.Solid} + Ley_{Cab.Flot.liquid} * Ton_{Cab.Flot.} * \frac{(1-\%S)}{\%S} \quad (23)$$

De (22) y (23):

$$\%Rec_{Lixiviación} = \frac{C.M._{Cab.Lix.} - C.M._{Cab.Flot.}}{C.M._{Alim.General}} * 100\% \quad (24)$$

La estimación de la producción de esta sección está en función del relave y alimento; sin embargo, estos resultados solo son para proporcionar una información de alcance, y para un valor preciso de la producción es necesario la caracterización de las soluciones cargadas de esta sección. Además, los flujos y leyes de las soluciones que son producto de la lixiviación deben ser medidas, estos son: Solución rica producto del espesamiento de cianuración y la solución cargada de la desorción del carbón.

- **En la sección de flotación:** El tonelaje alimentado en esta sección es equivalente al tonelaje alimentado a lixiviación, entonces:

$$Ton_{Cab.Flot.} = Ton_{alim.Gen} * \left(1 - \frac{\%H_{alim.Gen}}{100}\right) - Ton_{Conc.Grav} * \left(1 - \frac{\%H_{Conc.Grav}}{100}\right) \quad (25)$$

Debido a las mediciones de leyes de Au del alimento y dos productos (concentrado y relave flotación), el ratio de masa al concentrado se define como:

$$RC_{Conc} = \frac{Ley_{Cab.Flot.Solid} - Ley_{Rel.Flot.Solid}}{Ley_{Conc.Flot.Solid} - Ley_{Rel.Flot.Solid}} \quad (26)$$

Por lo tanto, el contenido metálico en el concentrado es estimado como:

$$C.M._{Conc.Flot} = Ton_{Cab.Flot} * RC_{Conc} * Ley_{Conc.Flot.Solid} \quad (27)$$

Y la eficiencia de esta sección se estimará:

$$\%Rec_{Flotación} = \frac{C.M.Conc.Flota}{C.M.Atim.General} * 100\% \quad (28)$$

- **Eficiencia diaria del proceso:** Será estimada de la eficiencia de las 3 secciones:

$$\%Rec_{General} = \%Rec_{Grav.} + \%Rec_{Lixiviación} + \%Rec_{Flotación} \quad (29)$$

La descripción de las variables y resumen de las ecuaciones son mostradas en Anexo N° 4.

### 3.3.2 Incertidumbres de mediciones experimentales

Las incertidumbres de las mediciones asumidas para evaluación del método propuesto son mostradas en las siguientes tablas:

**Tabla 3.11.** Precisión de las mediciones en alimento general – Método alternativo

Sección	Componente	RSD, Caso		
		Teórico	Aceptable	Crítico
Cabeza general	Tonelaje, t/d	0.5%	2.0%	5.0%
	Humedad, %	2.0%	5.0%	10.0%

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.12.** Precisión de las mediciones en lixiviación – Método alternativo

Sección	Componente	RSD, Caso		
		Teórico	Aceptable	Crítico
Lixiviación	Ley Au en cabeza, g/t	0.4%	1.5%	3.0%
	Ley Ag en cabeza, g/t	0.4%	1.5%	3.0%

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.13.** Precisión de las mediciones en gravimetría – Método alternativo

Sección	Componente	RSD, Caso		
		Teórico	Aceptable	Crítico
Gravimetría	Humedad del concentrado, %	1.0%	2.5%	7.5%
	Ley Au del concentrado, g/t	0.5%	1.0%	3.5%
	Ley Ag del concentrado, g/t	0.5%	1.5%	3.5%

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.14.** Precisión de las mediciones en flotación – Método alternativo

Flujo	Componente	RSD, Caso		
		Teórico	Aceptable	Crítico
Flotación	Ley Au en cabeza - Sólidos, g/t	0.5%	1.5%	5.0%
	Ley Ag en cabeza - Sólidos, g/t	0.3%	1.5%	5.0%
	Ley Au en concentrado - Sólidos, g/t	0.5%	1.5%	7.0%
	Ley Ag en concentrado - Sólidos, g/t	0.5%	1.5%	7.0%
	Ley Au en Relave - Sólidos, g/t	1.0%	2.0%	7.0%
	Ley Ag en Relave - Sólidos, g/t	1.0%	2.0%	7.0%
	Ley Au solución, g/t	0.5%	2.5%	7.5%
	Ley Ag solución, g/t	0.5%	2.5%	7.5%
	Flujo de alimentación, m <sup>3</sup> /h	0.5%	1.0%	3.0%
	Concentración de sólidos de la pulpa, %	0.5%	1.0%	5.0%
	Densidad de Pulpa, t/m <sup>3</sup>	0.5%	1.0%	4.0%

Fuente: Elaboración propia

De las Tabla 3.11, Tabla 3.12, Tabla 3.13 y Tabla 3.14, las precisiones de las leyes son menores que en el método inicial; puesto que, entre las recomendaciones del método inicial se plantea un cambio del diseño de los cortadores automáticos instalados inicialmente y además algunas mediciones son omitidas debido a que no son requeridos en el método propuesto.

### 3.3.3 Resultados

Análogamente a la sección anterior empleando la teoría de propagación de errores, se realizó la estimación de las incertidumbres en la recuperación y producción para este método alternativo y son mostrados en las siguientes tablas.

**Tabla 3.15.** Incertidumbres en la recuperación de Au – Método Propuesto

Caso	Unid.	Gravimetría	Lixiviación	Flotación	Total
Recuperación media, Au	%	22.5	72.2	2.2	96.9
Teórica	%	± 0.24	± 0.28	± 0.04	± 0.37
Normal	%	± 0.63	± 0.88	± 0.11	± 1.09
Crítico	%	± 2.08	± 2.47	± 0.37	± 3.26

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.16.** Incertidumbres en la recuperación de Ag - Método Propuesto

Caso	Unid.	Gravimetría	Lixiviación	Flotación	Total
Recuperación media, Ag	%	6.51	55.2	14.4	76.1
Teórica	%	± 0.07	± 0.49	± 0.35	± 0.60
Normal	%	± 0.20	± 1.54	± 1.00	± 1.85
Crítico	%	± 0.62	± 4.31	± 3.67	± 5.69

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.17.** Incertidumbres en la producción de Au - Método Propuesto

Caso	Unid.	Gravimetría	Lixiviación	Flotación	Total
Producción media, Au	g/d	3,123	10,028	308	13,459
Teórica	g/d	± 26	± 88	± 5	± 92
Normal	g/d	± 52	± 308	± 16	± 312
Crítico	g/d	± 220	± 718	± 53	± 753

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.18.** Incertidumbres en la producción de Ag - Método Propuesto

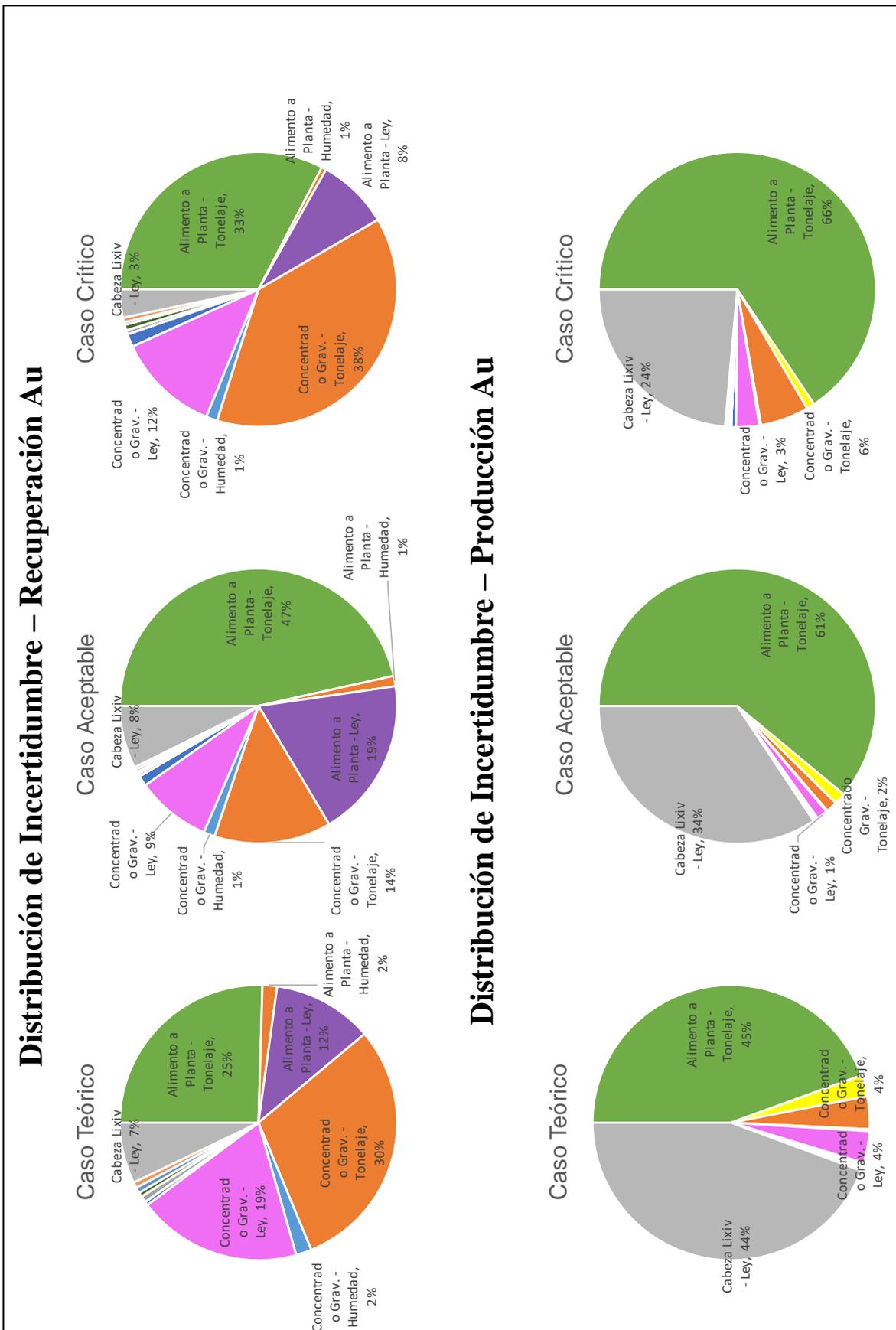
Caso	Unid.	Gravimetría	Lixiviación	Flotación	Total
Producción media, Ag	g/d	1,509	12,794	3,327	17,630
Teórica	g/d	± 12	± 194	± 36	± 198
Normal	g/d	± 25	± 648	± 123	± 660
Crítico	g/d	± 106	± 1,604	± 420	± 1,661

Fuente: Elaboración propia

La distribución de errores en la estimación de la recuperación y producción de Au para cada caso son mostrados en la Figura 3.8, donde:

- Para la recuperación de Au: El tonelaje de alimentación a planta y concentrado gravimétrico son mediciones con mayor aportación en la incertidumbre.
- Para la producción de Au: Las mediciones con mayor aporte de incertidumbre son el tonelaje en el alimento a planta concentradora y la ley de Au en la cabeza de lixiviación

La producción es sensible a cambios en la incertidumbre del tonelaje de alimentación a planta.



**Figura 3.8.** Distribución de incertidumbre – Recuperación y producción total Au

Fuente: Elaboración propia

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

#### **4.1 Análisis de Comparación de Resultados**

En esta sección se realizará un análisis comparativo de los resultados de las incertidumbres generadas con la metodología inicial y la propuesta.

En la siguiente Figura 4.1 se muestra los intervalos de confianza para la recuperación de oro:

- Para cada etapa del proceso se muestra que la precisión con el método propuesto es mejor, esto es para cada caso o escenario que se planteó.
- Para la sección de lixiviación: Condiciones iniciales de la planta indicaron que la operación se encuentra en caso crítico (ver Anexo N° 3), por lo que, mejorando el estado de los cortadores y adoptando el método alternativo, el proceso se sitúa en un caso aceptable.
- Para la recuperación total en la planta, la metodología inicial de la planta indica que la incertidumbre está entre el caso crítico y aceptable, entre  $\pm 3.8\%$  y  $\pm 8.5\%$ .; mientras que, con el método alternativo, y los cambios que este método sugiere, la operación estará ubicada en el método aceptable,  $\pm 1.2\%$ .

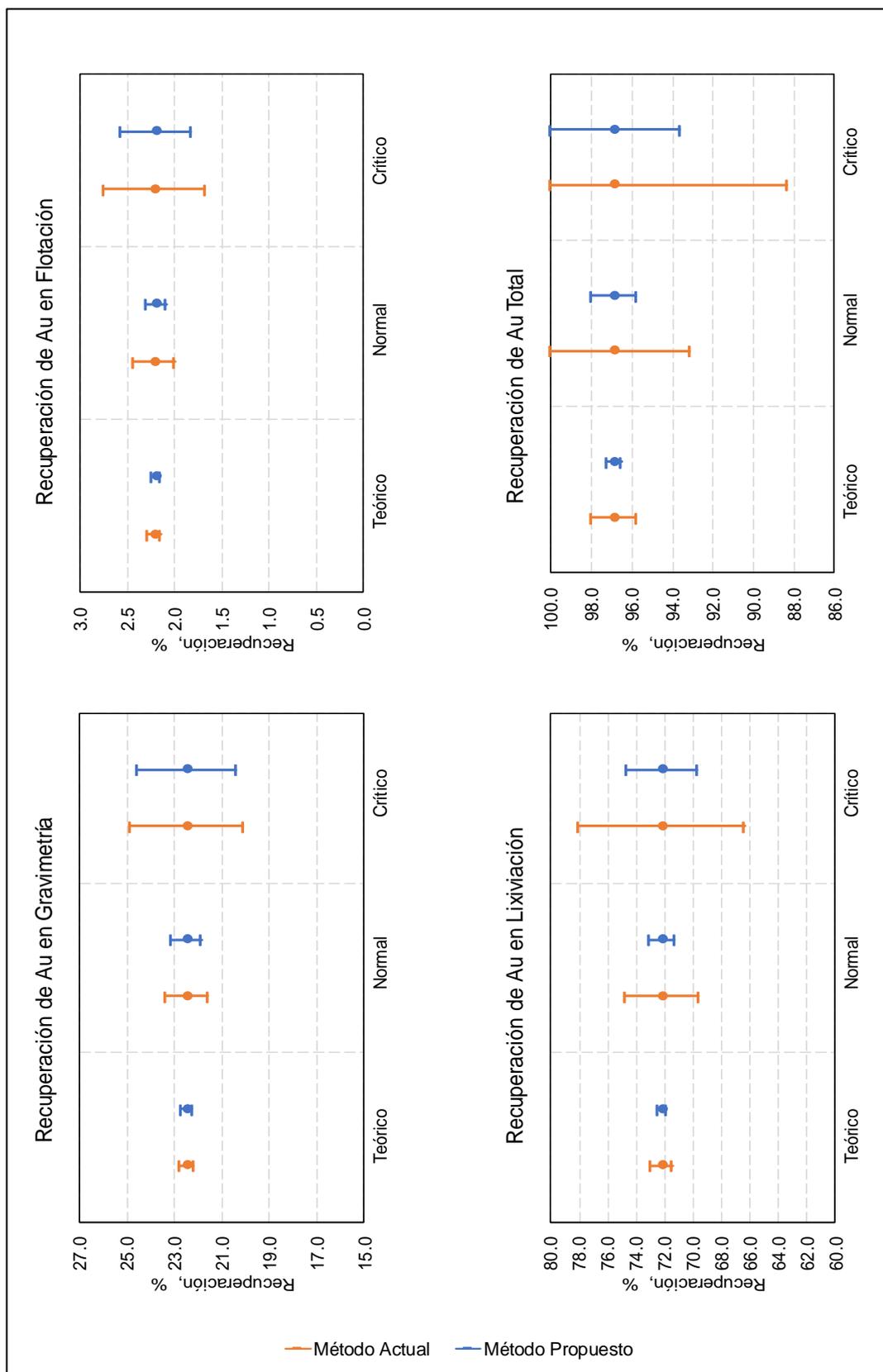
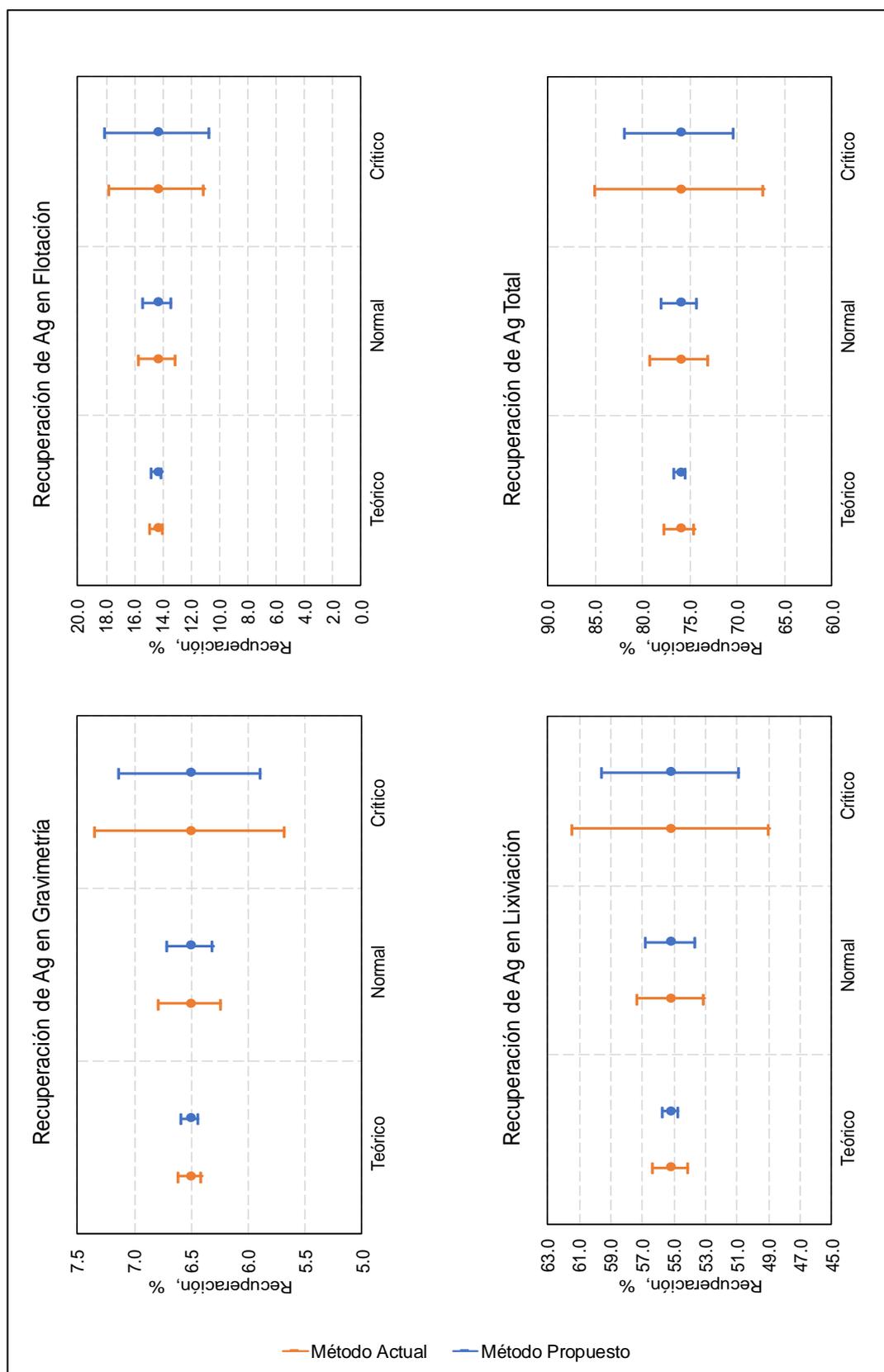


Figura 4.1. Intervalo de confianza de la recuperación de Au por secciones

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente *Figura 4.2*, se muestra los intervalos de confianza para la recuperación de plata:

- Análogamente se muestra que la metodología propuesta tiene mejor precisión para cada escenario planteado.
- Para sección de gravimetría: La incertidumbre disminuye debido al aumento en la precisión de las leyes.
- Para la sección de flotación: No existen diferencias significativas entre el método inicial y el propuesto; debido a que, no se realizaron modificación en las estimaciones de la recuperación de esta sección.
- Para la recuperación total en la planta: Metodología inicial de la planta indica que la incertidumbre está entre el caso crítico y aceptable, entre  $\pm 3.0\%$  y  $\pm 8.9\%$ ; mientras que, con el método alternativo, y los cambios que este método sugiere, la operación es ubicada en el método aceptable,  $\pm 1.9\%$ .



**Figura 4.2.** Intervalo de confianza de la recuperación de Ag por secciones

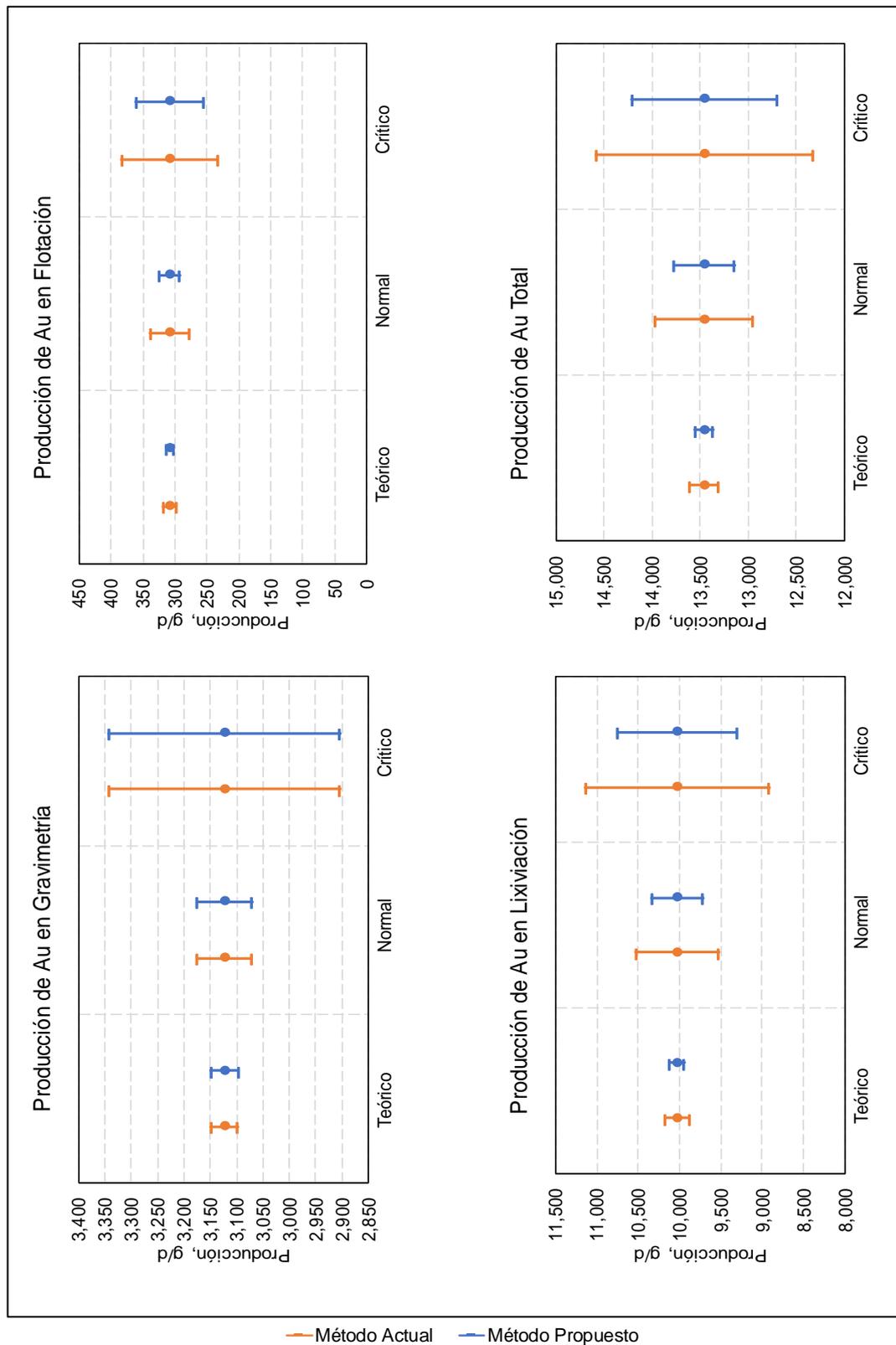
Fuente: Elaboración propia

Análisis para las producciones de Au y Ag son mostrados en las siguientes figuras, Figura 4.3 y la Figura 4.4 respectivamente.

- En la estimación de la producción, el método propuesto muestra mayor precisión que método inicial en las secciones de lixiviación y flotación.
- Para la producción total de Au: Las condiciones y método inicial muestra una incertidumbre de  $\pm 505$  g/d a 1,127 g/d, entre caso aceptable y crítico; mientras que, considerando método propuesto, la operación se encontraría en el caso aceptable con  $\pm 312$  g/d.
- Para la producción total de Ag: Las condiciones y método inicial muestra una incertidumbre de  $\pm 835$  g/d a 2,437 g/d, entre caso aceptable y crítico; mientras que, considerando método propuesto, la operación se encontraría en el caso aceptable con  $\pm 420$  g/d.

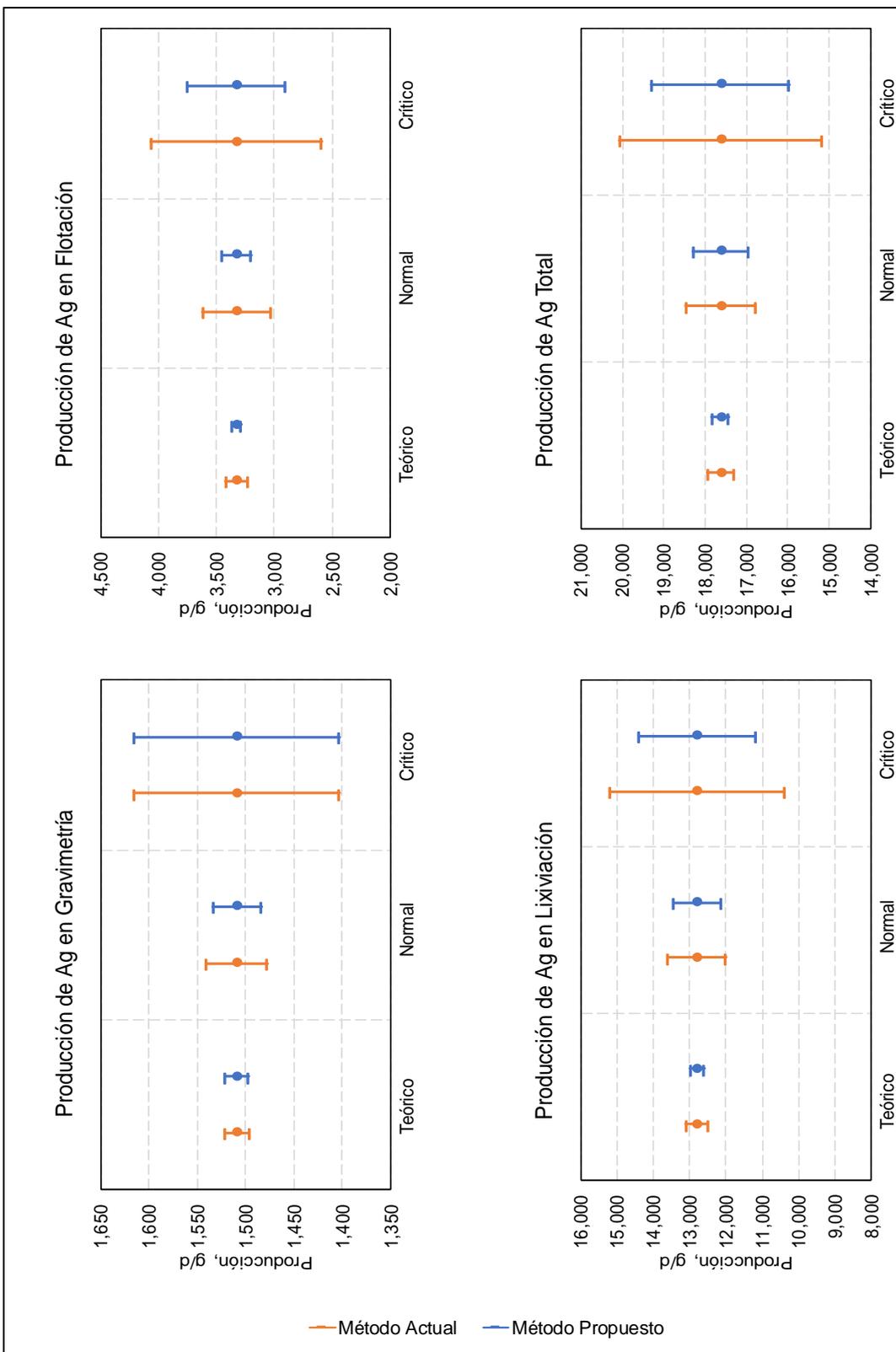
Por lo tanto, si consideramos que el precio del oro es de 1,780 US\$/oz; entonces, se estima que la incertidumbre en el sistema de contabilidad inicial se redujo de 867.1 KUS\$/mes – 1,935 KUS\$/mes, a un valor de 535 KUS\$/mes, entonces, se ha disminuido la incertidumbre del sistema de contabilidad entre 331 KUS\$ a 1,399 KUS\$ por mes.

Recordar que este valor de miles de dólares no es considerado un ahorro; sino, es tener un valor producción de millones de dólares con una mejor precisión y por ende una mejor confianza para la futura toma de decisiones como inversión, ganancias, etc.



**Figura 4.3.** Intervalo de confianza de la producción de Au por secciones

Fuente: Elaboración propia



**Figura 4.4.** Intervalo de confianza de la producción de Ag por secciones  
 Fuente: Elaboración propia

## CONCLUSIONES

Para la evaluación de incertidumbres, 03 casos fueron planteados, variando las incertidumbres de mediciones en planta: caso teórico, aceptable y crítico.

La etapa de lixiviación aporta mayor recuperación y producción de Au y Ag, por eso el impacto de su incertidumbre se refleja en la recuperación y producción total.

Con respecto al método propuesto para la estimación de recuperación y producción:

- La metodología involucra los siguientes cambios como el contenido metálico en la alimentación general, que se estima a partir de la suma de los contenidos del concentrado y relave gravimétrico; las mediciones de la pulpa de alimento a flotación como Flujo o caudal de pulpa ( $\text{m}^3/\text{h}$ ), la densidad de pulpa ( $\text{t}/\text{m}^3$ ), la concentración de sólidos (%) y la ley en sólido y en solución de Au y Ag ( $\text{g}/\text{t}$ ) y mejorar y/o cambiar el diseño de cortadores, optimizar los protocolos de muestreo y análisis químico en cortadores instalados.
- Distribución de errores muestra que las mediciones con mayor aporte en las incertidumbres de recuperación y producción son el tonelaje en el alimento a planta, la ley en la cabeza de lixiviación y el tonelaje con leyes en el concentrado gravimétrico.

Resultados de la estimación de la incertidumbre total en la recuperación y producción de Au y Ag respectivamente se muestran en las siguientes tablas:

Propiedad	Recuperación Total de Au, %		Producción Total de Au, g/d	
	Inicial	Alternativa	Inicial	Alternativa
Valor	96.9	96.9	13,459	13,459
Teórica	± 1.1	± 0.4	± 146	± 92
Normal	± 3.8	± 1.2	± 505	± 312
Crítico	± 8.6	± 3.3	± 1,127	± 753

Propiedad	Recuperación Total de Ag, %		Producción Total de Ag, g/d	
	Inicial	Alternativa	Inicial	Alternativa
Valor	76.1	76.1	17,630	17,630
Teórica	± 1.6	± 0.6	± 314	± 198
Normal	± 3.0	± 1.9	± 835	± 660
Crítico	± 8.9	± 5.7	± 2,437	± 1,661

Diferencias entre las incertidumbres de la producción de Au por el método inicial y método propuesto indican:

- Condiciones iniciales sitúan a la incertidumbre de la recuperación y producción entre caso aceptable y crítico, resultando en una incertidumbre de ± 505 g Au/d a 1,127 g Au/d
- Considerando método propuesto, la operación se encontraría en el caso aceptable con ± 312 g Au/d.

Por lo tanto, obtener un sistema de contabilidad metalúrgica incurre en tener un valor producción de millones de dólares con una mejor precisión y por ende una mejor confianza para la futura toma de decisiones como inversión, ganancias, etc.

## RECOMENDACIONES

- Realizar una evaluación exhaustiva de los protocolos de muestreos y preparaciones de muestra cuantificará una incertidumbre con mayor consistencia en cada medición experimental y, por lo tanto, en qué caso se encuentran las operaciones iniciales.
- Se recomienda realizar una evaluación de los diseños de los muestreadores, para la obtención de muestras representativas.
- Este cambio aumentará significativamente la precisión de los targets.
- Una vez identificado aquella medición con mayor aporte en las incertidumbres de los targets de la contabilidad metalúrgica, se recomienda modificar el equipo de medición o en todo caso plantear una medición alterna; de esta manera, obtener mediciones consistentes y de mayor precisión.
- Se recomienda evaluar alternativas de estimación de la recuperación y producción de finos, en el cual se reduzca la incertidumbre de estos valores, obteniendo de esta manera resultados confiables y consistentes en el sistema de contabilidad. Además, la instalación de flujómetros y densímetros son mediciones que al incorporarse en la estimación de otros cálculos del sistema de contabilidad mejorarán la precisión de esta.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Alcalá L., Grados B., Yupac P., (2017), “*Elaboración de Nomogramas de Muestreo usando la Teoría de Pierre GY*”
- [2]. Brochot, S.; Durance, M. (2012), “*A New Approach to Metallurgical Accounting*”
- [3]. Carneiro R. (2018), “*Contabilidad Metalúrgica – I International Congress on Minerals Sampling*”
- [4]. Dominy, S. (2016), “*Importance of good sampling practice throughout the gold mine value chain*”
- [5]. Gran Colombia Gold - Planta Maria Dama (2012), “*Desarrollo de Bases para el Sistema de Contabilidad Metalúrgica - Planta Beneficio Maria Dama*”
- [6]. Loimia J., Minkkinen P., Von Alfthan C., Lohilahti J., Korpela T., (2015). “*Evaluation of Sampling Error Sources in a Multiple Cutter Metallurgical Sampler*”
- [7]. Minnitt, R. (2014), “*Sampling in the South African minerals industry*”
- [8]. Morrison, R., (2007), “*Código AMIRA P754: Metal accounting, code of practice and guidelines - Release 3*”
- [9]. Morrison R., Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre – The University of Queensland (2008), “*An Introduction to Metal Balancing and Reconciliation*”
- [10]. Napier T., Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre – The University of Queensland (2020), “*Statistical Methods for Mineral Engineers*”
- [11]. Outotec – Gold Fields (2015), “*Sampling audit & upgrade recommendation report*”
- [12]. Pitard F., (1993), “*PIERRE GY'S SAMPLING THEORY AND SAMPLING PRACTICE*”, editorial CRC Press, 2nd ed.

## ANEXOS

**Anexo N° 1.** Reportes de mediciones promedio del sistema de contabilidad.

Etapa	Componente	Unidad	Guardia 1	Guardia 2	Guardia 3
Alimento General	Tonelaje	t/d	535	526	537
	Humedad	%	5.77	5.64	5.41
	Ley Au	g/t	9.32	8.95	9.37
	Ley Ag	g/t	15.0	16.3	14.7
Concentrado Gravimétrico	Tonelaje	t/d	0.44	0.43	0.44
	Humedad	%	9.92	11.6	11.6
	Ley Au	g/t	2,686	2,498	2,897
	Ley Ag	g/t	1,223	1,387	1,299
Alimento lixiviación	Ley Au	g/t	7.2	7.0	7.2
	Ley Ag	g/t	14.1	15.3	13.7
Cabeza de Flotación	Ley Au en sólido	g/t	0.46	0.45	0.46
	Ley Ag en sólido	g/t	4.69	4.68	4.34
	Ley Au en solución	g/t	0.029	0.032	0.032
	Ley Ag en solución	g/t	1.17	1.18	1.19
	Densidad de Pulpa en alimento	t/m <sup>3</sup>	1,418	1,418	1,418
	Flujo Alimentación	m <sup>3</sup> /h	750	750	738
	%Sólidos en la alimentación	%	47.4%	47.4%	47.4%
Concentrado flotación	Ley Au	g/t	58.5	61.4	56.1
	Ley Ag	g/t	863	821	813
Relave de Flotación	Ley Au en sólido	g/t	0.25	0.25	0.26
	Ley Ag en sólido	g/t	2.43	2.18	2.52
	Ley Au en solución	g/t	0.029	0.032	0.032
	Ley Ag en solución	g/t	1.17	1.17	1.19



**Anexo N° 3. Evaluación de cortadores en los puntos de muestreo de la contabilidad**

	Cabeza General		Cabeza Lixiviación		Cabeza Flotación		Relave Flotación		Cabeza Flotación	
	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO
<b>EL CORTADOR</b>										
Se mueve en forma transversal al flujo.	X			X	X		X		X	
Corta la totalidad del flujo.	X			X		X		X		X
El perímetro del cortador es rectangular.		X	X		X		X		X	X
<b>SISTEMA MOTRIZ</b>										
Esta accionado por un motor eléctrico.	X		X		X		X		X	
<b>VELOCIDAD DEL CORTADOR</b>										
La velocidad del cortador es constante siempre.	X		X		X			X		X
Existe un sistema para garantizar la constancia.		X		X	X			X		X
La velocidad es inferior a 45 cm/s.	X		X		X		X		X	
<b>UBICACIÓN ESTACIONAMIENTO DEL CORTADOR</b>										
Está ubicado a más de 30 cm del flujo.	X			X	X			X		X
Está en una posición cubierta de polvo y contaminación.	X		X		X			X		X
Está centrado respecto al flujo.		X		X		X			X	
El cortador sobrepasa el flujo por al menos 50 cm.	X			X	X			X		X
<b>EXTRACCIÓN CORRECTA DE INCREMENTOS</b>										
Las hojas del cortador son paralelas.		X		X	X				X	
Las hojas del cortador son afiladas.		X		X		X			X	
La longitud del cortador es mayor que la altura del flujo.	X			X	X		X		X	
La posición del cortador es perpendicular al flujo.	X			X	X		X		X	
Se recuperan todos los flujos secundarios.	X			X	X		X		X	
La abertura mínima es mayor que 1 cm.		X		X	X		X		X	X
Existe protección contra salpicaduras o contaminación.	X		X		X		X		X	
<b>INSPECCION Y MANTENCIÓN</b>										
Existen puertas de inspección.	X		X		X		X		X	
Las puertas de inspección permiten ver el cortador estacionado.	X		X		X		X		X	
Las puertas son fáciles de abrir y cerrar.	X		X		X		X		X	X
<b>CAIDAS LIBRES</b>										
Distancia vertical entre cortadores del sistema es menor a 2m.		X		X	X		X		X	
<b>GENERAL</b>										
El sistema es fácil de limpiar.		X	X		X		X		X	
Es fácil colocar y retirar el receptor de muestra.	X		X		X			X		X
El personal es apto para operar el sistema de muestreo.	X		X		X		X		X	X
Las muestras obtenidas tienen sellos para mantener integridad.	X		X		X		X		X	X
<b>CORREAS O CANALES DE TRASPASO</b>										
El canal de flujo tienen cortagoteras.										
<b>RELACION DE CORTES ENTRE CORTADOR PRIMARIO Y SECUNDARIO</b>										
Por cada corte primario el secundario lo hace 7 veces.	X		X		X		X		X	X

#### Anexo N° 4. Método alternativo – Metodología

Se define a las siguientes variables:

- $C.M_{Alim\ General}$  : Contenido metálico alimento general
  - $C.M_{Conc\ Grav}$  : Contenido metálico en concentrado gravimétrico
  - $C.M_{Cab.Lix.}$  : Contenido metálico en la cabeza lixiviación
  - $C.M_{Cab\ Flot}$  : Contenido metálico en cabeza flotación
  - $C.M_{Rel\ Flot}$  : Contenido metálico en relave flotación
  - $Ton_{Alim\ General}$  : Tonelaje alimento
  - $Ton_{Conc\ Grav}$  : Tonelaje concentrado gravimétrico
  - $Ton_{Cab\ Flot}$  : Tonelaje cabeza de flotación
  - $Ton_{Rlve}$  : Tonelaje relave
  - $Ley_{Alim.Lixiv.}$  : Ley de alimento a lixiviación
  - $Ley_{Cab\ Flot\ Solid}$  : Ley de cabeza de flotación de sólido
  - $Ley_{Rlve\ Flot\ Solid}$  : Ley de relave de flotación de sólido
  - $Ley_{Conc\ Flot\ Solid}$  : Ley de concentrado de flotación de sólido
  - %S : Porcentaje de sólidos en la flotación
  - $F$  : Flujo de alimento a Flotación
  - $\rho$  : Densidad de pulpa alimentado a flotación
  - %H : Porcentaje de humedad de las corrientes
  - $RC_{Conc}$  : Ratio másico al concentrado
  - $Rec_{Grav}$  : Recuperación gravimétrica
  - $Rec_{Lixiviación}$  : Recuperación lixiviación
  - $Rec_{Flotación}$  : Recuperación flotación
- Para la estimación de contenido metálico en la alimentación:

$$C.M_{Conc.Grav.} = Ton_{Conc.Grav.} \left(1 - \frac{\%H_{Conc.Grav.}}{100}\right) Ley_{Conc.Grav.} \quad (1)$$

$$C.M_{Cab.Lix.} = \left(Ton_{Alim.General} \left(1 - \frac{\%H_{Alim.General}}{100}\right) - Ton_{Conc.Grav.} \left(1 - \frac{\%H_{Conc.Grav.}}{100}\right)\right) Ley_{Alim.Lixiv.} \quad (2)$$

$$C.M_{Alim.General} = C.M_{Conc.Grav.} + C.M_{Cab.Lix.} \quad (3)$$

- En la sección gravimetría, la recuperación se estima:

$$\%Rec_{Grav.} = \frac{C.M_{Conc.Grav.}}{C.M_{Alim.General}} * 100\% \quad (4)$$

- Sección Lixiviación

Para esta sección se requiere la estimación del tonelaje de cabeza de flotación como:

$$Ton_{Cab.Flot.} = F * \%S * \rho \quad (5)$$

De esto, se estima el contenido metálico en la cabeza de flotación como:

$$C.M_{Cab.Flot.} = Ton_{Cab.Flot.} * Ley_{Cab.Flot.Solid} + Ley_{Cab.Flot.liquid} * Ton_{Cab.Flot.} * \frac{(1-\%S)}{\%S} \quad (6)$$

Por lo tanto, la recuperación para esta sección queda determinada por la ecuación:

$$\%Rec_{Lixiviación} = \frac{C.M_{Cab.Lix.} - C.M_{Cab.Flot.}}{C.M_{Alim.General}} * 100\% \quad (7)$$

- Para la sección Flotación:

En esta sección se considera el cálculo de tonelaje de cabeza de flotación, como:

$$Ton_{Cab.Flot.} = Ton_{Alim.Gen} * \left(1 - \frac{\%H_{Alim.Gen}}{100}\right) - Ton_{Conc.Grav} * \left(1 - \frac{\%H_{Conc.Grav}}{100}\right) \quad (8)$$

Además, el mass pull de flotación (ratio de masa del concentrado) en función a las leyes de Au es determinado:

$$RC_{Conc} = \frac{Ley_{Cab.Flot.Solid} - Ley_{Rel.Flot.Solid}}{Ley_{Conc.Flot.Solid} - Ley_{Rel.Flot.Solid}} \quad (9)$$

Nota:

El  $RC_{Conc}$  en función de leyes de Au se mantendrá para estimación de producción y recuperación de Ag

Por lo tanto, queda estimada el contenido metálico del concentrado como:

$$C.M._{Conc.Flota} = Ton_{Cab.Flota} * Ley_{Conc.Flota.Solid} * RC_{Conc}$$

Para el cálculo de la recuperación de flotación se tiene:

$$\%Rec_{Flotación} = \frac{C.M._{Conc.Flota}}{C.M._{Alim.General}} * 100\% \quad (10)$$

- Recuperación General

$$\%Rec_{General} = \%Rec_{Grav.} + \%Rec_{Lixiviación} + \%Rec_{Flotación} \quad (11)$$

## Anexo N° 5. Ecuaciones para estimación de incertidumbres

### • Recuperación gravimétrica

$$\begin{aligned}\sigma_{Grav.}^2 = & \left( \frac{\partial Grav.}{\partial TonCabeza} \right)^2 \sigma_{TonCabeza}^2 + \left( \frac{\partial Grav.}{\partial \%HumCabeza} \right)^2 \sigma_{\%HumCabeza}^2 + \\ & \left( \frac{\partial C}{\partial \%LeyCabeza} \right)^2 \sigma_{\%LeyCabeza}^2 + \left( \frac{\partial Grav.}{\partial TonConc.Grav.} \right)^2 \sigma_{TonConc.Grav.}^2 + \\ & \left( \frac{\partial Grav.}{\partial \%HumConc.Grav.} \right)^2 \sigma_{\%HumConc.Grav.}^2 + \left( \frac{\partial C}{\partial \%LeyConc.Grav.} \right)^2 \sigma_{\%LeyConc.Grav.}^2\end{aligned}$$

### • Recuperación lixiviación

$$\begin{aligned}\sigma_{Lix}^2 = & \left( \frac{\partial Lix}{\partial TonCabeza} \right)^2 \sigma_{TonCabeza}^2 + \left( \frac{\partial Lix}{\partial \%HumCabeza} \right)^2 \sigma_{\%HumCabeza}^2 + \\ & \left( \frac{\partial Lix}{\partial \%LeyCabeza} \right)^2 \sigma_{\%LeyCabeza}^2 + \left( \frac{\partial Lix}{\partial TonConc.Grav.} \right)^2 \sigma_{TonConc.Grav.}^2 + \\ & \left( \frac{\partial Lix}{\partial \%HumConc.Grav.} \right)^2 \sigma_{\%HumConc.Grav.}^2 + \left( \frac{\partial Lix}{\partial \%LeyConc.Grav.} \right)^2 \sigma_{\%LeyConc.Grav.}^2 + \\ & \left( \frac{\partial CIL}{\partial \%LeyCab.Flot.Solid.} \right)^2 \sigma_{\%LeyCab.Flot.Solid.}^2 + \\ & \left( \frac{\partial Lix}{\partial \%LeyCab.Flot.Liquid.} \right)^2 \sigma_{\%LeyCab.Flot.Liquid.}^2 + \left( \frac{\partial Lix}{\partial G.E.} \right)^2 \sigma_{G.E.}^2 + \\ & \left( \frac{\partial Lix}{\partial Dens.Pulp} \right)^2 \sigma_{Dens.Pulp}^2\end{aligned}$$

- **Recuperación flotación**

$$\begin{aligned}
\sigma_{Flot.}^2 = & \left( \frac{\partial Flot.}{\partial Ton_{Cabeza}} \right)^2 \sigma_{Ton_{Cabeza}}^2 + \left( \frac{\partial Flot.}{\partial \%Hum_{Cabeza}} \right)^2 \sigma_{\%Hum_{Cabeza}}^2 + \\
& \left( \frac{\partial Flot.}{\partial \%Ley_{Cabeza}} \right)^2 \sigma_{\%Ley_{Cabeza}}^2 + \left( \frac{\partial Flot.}{\partial Ton_{Conc.Grav.}} \right)^2 \sigma_{Ton_{Conc.Grav.}}^2 + \\
& \left( \frac{\partial Flot.}{\partial \%Hum_{Conc.Grav.}} \right)^2 \sigma_{\%Hum_{Conc.Grav.}}^2 + \\
& \left( \frac{\partial Flot.}{\partial \%Ley_{Cab.Flot.Solid.}} \right)^2 \sigma_{\%Ley_{Cab.Flot.Solid.}}^2 + \\
& \left( \frac{\partial Flot.}{\partial \%Ley_{Conc.Flot.Solid.}} \right)^2 \sigma_{\%Ley_{Conc.Flot.Solid.}}^2 + \\
& \left( \frac{\partial Flot.}{\partial \%Ley_{Rel.Flot.Solid.}} \right)^2 \sigma_{\%Ley_{Rel.Flot.Solid.}}^2 + \\
& \left( \frac{\partial Flot.}{\partial \%Ley_{Rel.Flot.Liquid.}} \right)^2 \sigma_{\%Ley_{Rel.Flot.Liquid.}}^2 + \left( \frac{\partial Flot.}{\partial G.E.} \right)^2 \sigma_{G.E.}^2 + \\
& \left( \frac{\partial Flot.}{\partial Dens.Pulp} \right)^2 \sigma_{Dens.Pulp}^2
\end{aligned}$$

- **Recuperación total**

$$\sigma_{Rec\_Total}^2 = \left( \frac{\partial Rec\_Total}{\partial Grav.} \right)^2 \sigma_{Grav.}^2 + \left( \frac{\partial Rec\_Total}{\partial CIL} \right)^2 \sigma_{CIL}^2 + \left( \frac{\partial Rec\_Total}{\partial Flot} \right)^2 \sigma_{Flot}^2$$