

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**INSTITUTO DE METALURGIA**



**ESTUDIO DEL EFECTO DE LA FORMA Y TAMAÑO DE LAS  
PARTÍCULAS EN LAS INTENSIDADES EN UN ANALIZADOR DE  
ELEMENTOS EN LÍNEA (FRX)**

**TESIS**

**PARA OPTAR POR EL GRADO DE MAestrÍA EN  
INGENIERÍA DE MINERALES**

**PRESENTA**

**I.Q. JOSÉ MANUEL HERNÁNDEZ COVARRUBIAS**

**ASESOR**

**DR. ANTONIO ARAGON PIÑA**

**CO-ASESOR**

**M.C. ROMÁN CRUZ ORTEGA**

**SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P. 29 SEPTIEMBRE DE 2022**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
*UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ*

---

*INSTITUTO DE METALURGIA*  
*POSGRADRO EN INGENIERÍA DE MATERIALES*

*CARTA DE ACEPTACIÓN DEFINITIVA DE TESIS DE MAESTRÍA*

**José Manuel Hernández Covarrubias**

“Estudio del efecto de la forma y tamaño de las partículas en las intensidades en un analizador de elementos en línea (FRX)”

**Sinodales**

Dr. Antonio Aragón Piña

\_\_\_\_\_

MC. Román Cruz Ortega

\_\_\_\_\_

Dr. Juan José Frausto González

\_\_\_\_\_

Dr. Gilberto Rosales Marín

\_\_\_\_\_

Dra. María Isabel Lázaro Báez

\_\_\_\_\_



FACULTAD DE INGENIERÍA

16 de junio de 2022

**ING. JOSÉ MANUEL HERNÁNDEZ COVARRUBIAS  
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Antonio Aragón Piña y el M. C. Román Cruz Ortega** Asesor y Coasesor de la Tesis que desarrollará Usted con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Ingeniería de Minerales**, me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 16 de junio del presente año, fue aprobado el Temario propuesto:

**TEMARIO:**

**“ESTUDIO DEL EFECTO DE LA FORMA Y TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS EN LAS INTENSIDADES EN UN ANALIZADOR DE ELEMENTOS EN LÍNEA (FRX)”**

**INTRODUCCIÓN**

1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN PARA DETERMINAR EL EFECTO DE FORMA Y TAMAÑO DE PARTÍCULA EN LA MEDICIÓN DE INTENSIDADES EN UN ANALIZADOR DE ELEMENTOS EN LÍNEA.
2. MARCO TEÓRICO DE FUNCIONAMIENTO DEL ANALIZADOR DE ELEMENTOS EN LÍNEA, CRIBAS E HIDROCICLONES.
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA ANALIZAR LAS VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE ANÁLISIS EN LÍNEA.
4. ANÁLISIS DE LAS PRINCIPALES VARIABLES DEL PROCESO UTILIZANDO EL MÉTODO DE EVALUACIÓN DE ESTADÍSTICA T-STUDENT DE DOS VARIABLES.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DE TRABAJO A FUTURO.  
REFERENCIAS.

**“MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO”**

**ATENTAMENTE**

**DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN  
DIRECTOR**



ANIVERSARIO DE LA AUTONOMÍA  
UASLP 2023

www.uaslp.mx

Copia. Archivo.  
\*etn

Av. Manuel Nava 8  
Zona Universitaria - CP 78290  
San Luis Potosí, S.L.P.  
tel. (444) 826 2330 al39  
fax (444) 826 2336

**“Rumbo al centenario de la autonomía universitaria”**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Área de Investigación y Estudios de Posgrado**

**Aclaración**

El presente trabajo que lleva por título:

ESTUDIO DEL EFECTO DE LA FORMA Y TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS EN LAS INTENSIDADES DE UN ANALIZADOR DE LEMENTOS EN LÍNEA (FRX).

se realizó en el periodo Julio de 2018 a Agosto de 2022 bajo la dirección del Dr. Antonio Aragón Piña

**Originalidad**

Por este medio aseguro que he realizado este documento de tesis para fines académicos sin ayuda indebida de terceros y sin utilizar otros medios más que los indicados.

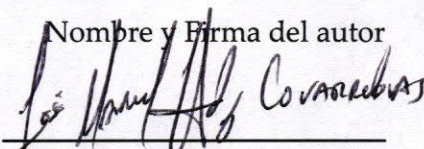
Las referencias e información tomadas directa o indirectamente de otras fuentes se han definido en el texto como tales y se ha dado el debido crédito a las mismas.

El autor exime a la UASLP de las opiniones vertidas en este documento y asume la responsabilidad total del mismo.

Este documento no ha sido sometido como tesis a ninguna otra institución nacional o internacional en forma parcial o total.

Se autoriza a la UASLP para que divulgue este documento de Tesis para fines académicos.

Nombre y Firma del autor



José Manuel Hernández Covarrubias



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE SAN LUIS POTOSÍ

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS  
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA VIRTUAL  
Zona Universitaria s/n C.P. 78290 Tel. 834 25 42 Fax 828-23-08  
San Luis Potosí, S.L.P. México



El que suscribe José Manuel Hernández Covarrubias,  
con domicilio en Calle del Sol # 461  
Colonia / fraccionamiento Ampliación la Rosita  
C.P. 27258 Tel. 444 142-6127 Ciudad Torreón Coahuila  
y en mi carácter de autor y titular de la tesis que  
lleva como nombre: ESTUDIO DEL EFECTO DE LA FORMA Y TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS EN LAS INTENSIDADES  
DE UN ANALIZADOR DE LEMENTOS EN LÍNEA (FRX), en lo sucesivo "LA OBRA" y por  
ende, cedo y autorizo a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, para que  
lleve a cabo la divulgación, publicación, reproducción, así como la digitalización  
de la obra, en formato electrónico y sin fines de lucro.

La Universidad Autónoma de San Luis Potosí, se compromete a respetar  
en todo momento mi autoría y a otorgarme el crédito correspondiente.

San Luis Potosí, S.L.P., a 12 de Agosto de 2002.

Atentamente,

José Manuel Hernández Covarrubias  
Autor

## DEDICATORIA

Me gustaría dedicar esta Tesis a toda mi familia. Especialmente para Mi esposa Iliana Vergara Reyes, porque me han impulsado todo lo que soy como persona, mis valores, mi perseverancia y mi empeño, y todo ello con una gran dosis de amor, es la persona que más directamente ha sufrido las consecuencias del trabajo realizado. Realmente ella me llena por dentro para conseguir un equilibrio que me permita dar el máximo de mí.

Para mis hijas, Daniela Alejandra Hernández Vergara, Valentina Hernández Vergara y Manola Hernández Vergara. Ellas son lo mejor que me ha pasado, y han venido a este mundo para darme el sentido a mi vida y amor, por ellas termine el trabajo de tesis y enseñarles que con amor todo se puede lograr, a darle siempre para adelante.

En la memoria de mis padres Manuel Hernández Gonzalez y María Evangelina Covarrubias Ortega que con su amor me enseñaron la importancia de la vida y a luchar por ser mejor, a mi madrina María Elena Covarrubias Ortega siempre creyó en mí y por último al “Señor” el TCC Alfonso Roberto Vergara Garcia, por sus consejos de sabiduría de la vida.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a dios por permitirme de terminar este ciclo y llegar a este momento de mi vida.

A mi mentor Ing. Juan Pablo Gonzalez Ríos, que en este proceso me permitió continuar preparándome y buscar la excelencia para mi as alto bien.

A mi co asesor MC Roman Cruz Ortega de permitirme apoyarlo durante el proceso de investigación.

A mi asesor y sinodales Dr. Antonio Aragon Piña, Dr. Cristóbal A. Pérez, Dr. Gilberto Rosales, Dra. María Isabel Lázaro, Dr. Juan Jose Frausto Gonzalez, Por su tiempo, recomendaciones y apoyo para poder realizar este trabajo.

A mis maestros del Instituto de Metalurgia Dr. Israel Rodríguez, Dra. Guadalupe Sánchez Loredó, Dr. José A. Delgadillo, Dr. Gilberto Rosales. Dr. Javier Aguilar Carrillo. Por compartir generosamente sus conocimientos con profesionalismo y paciencia.

A los compañeros Ing. Daniel Alejandro Manzo Martínez y Dr. Carlos Gerónimo, por su apoyo. A todos los compañeros, amigos y personas que estuvieron cerca de mí para apoyarme.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	XVII
RESUMEN .....	XVII
INTRODUCCIÓN .....	XVIII
CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN PARA DETERMINAR EL EFECTO DE FORMA Y TAMAÑO DE PARTÍCULAS EN LA MEDICIÓN DE INTENSIDADES DE UN ANALIZADOR DE ELEMENTOS EN LÍNEA .....	1
1.1. Justificación .....	1
1.2. Hipótesis .....	2
1.3. Objetivo general .....	2
1.4. Objetivos específicos .....	2
1.5. Antecedentes de la investigación .....	2
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO DE FUNCIONAMIENTO DEL ANALIZADOR DE ELEMENTOS EN LÍNEA, CRIBAS E HIDROCICLONES .....	4
2.1. Introducción .....	4
2.2. Descripción del Sistema analizador de elementos en línea .....	6
2.3. Determinaciones estadísticas usando el software de Outocal .....	23
2.4. Equipos de separación .....	25
CAPITULO 3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL PARA ANALIZAR LAS VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE ANÁLISIS EN LÍNEA. ....	37
3.1. Introducción .....	37
3.2. Análisis de datos .....	37
3.3. Evaluación estadística .....	37
3.4. Muestreo en línea .....	38
3.5. Muestras de calibración .....	39
3.6. Elaboración de modelos multivariantes de calibración .....	40
3.7. Microscopía óptica .....	42
3.8. Evaluación de la morfología .....	42
... ANÁLISIS DE LAS PRINCIPALES VARIABLES DEL PROCESO UTILIZANDO EL MÉTODO DE EVALUACIÓN DE ESTADÍSTICA T DE DOS VARIABLES. ....	45
CAPITULO 4. ....	45
4.1 Introducción .....	45
4.2 Evaluación estadística del tamaño de partícula y tonelaje por turno utilizando cribas vs hidrociclones .....	45
4.2.1 Evaluación de tamaño de partícula P80 .....	45
4.2.2 Evaluación de tonelaje alimentado .....	47
4.3 Evaluación de contenidos metálicos .....	49



4.3.1	Contenidos metálicos de Plata .....	49
4.3.2	Contenidos metálicos de Plomo .....	51
4.3.3	Contenidos Metálicos de Zinc .....	52
4.3.4	Contenidos Metálicos de Hierro .....	54
4.3.5	Contenidos Metálicos de Cobre .....	55
4.4	Evaluación de Intensidades en el proceso en línea.....	58
4.4.1	Intensidades de Plata .....	58
4.4.2	Intensidades de Plomo.....	59
4.4.3	Intensidades de Zinc.....	62
4.4.4	Intensidades de Hierro.....	64
4.4.5	Intensidades de Sólidos .....	65
4.4.6	Intensidades de Plata Background .....	67
4.5	Evaluación de contenidos metálicos vs tamaño de partícula P80 .....	69
4.5.1	Contenidos metálicos de Plomo vs Intensidades .....	69
4.5.2	Contenidos metálicos de Zinc vs Intensidades .....	71
4.5.3	Contenidos metálicos de Hierro vs Intensidades .....	73
4.5.4	Contenidos metálicos de Plata vs Intensidades.....	75
4.5.5	Contenidos metálicos de Plata background vs Intensidades de Plata background 77	
4.6	Evaluación de contenidos metálicos vs intensidades.....	79
4.7	Evaluación de Análisis de muestras de calibración.....	81
4.7.1	Tamaño de partícula de muestras de calibración. ....	81
4.7.2	Intensidad de Plomo de muestras de calibración. ....	83
4.7.3	Intensidad de Zinc de muestras de calibración. ....	85
4.7.4	Intensidad de Hierro de muestras de calibración. ....	87
4.7.5	Intensidad de Plata de muestras de calibración.....	89
4.7.6	Intensidad de Plata background de muestras de calibración.....	91
4.7.7	Intensidad de Sólidos de muestras de calibración.....	93
4.8	Elaboración de modelos multivariantes para la calibración.....	95
4.8.1	Modelo multivariable del tamaño de partícula P80 .....	95
4.8.2	Modelo multivariable para la Plata. ....	98
4.8.3	Modelo multivariable para el Plomo.....	101
4.8.4	Modelo Multivariable para el Zinc.....	103
4.8.5	Modelo multivariable para el Hierro.....	106
4.8.6	Modelo multivariable para el Sólido.....	109
4.9	Evaluación de la forma de las partículas libres. ....	112
4.10	Evaluación de redondez y esfericidad de partículas .....	117

4.10.1 Galena con cribas .....	117
4.10.2 Galena con hidrociclones.....	119
4.10.3 Esfalerita con cribas .....	120
4.10.4 Esfalerita con hidrociclones.....	122
4.10.5 Pirita con cribas.....	123
4.10.6 Pirita con hidrociclones .....	125
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DE TRABAJO A FUTURO.....	128
REFERENCIAS .....	130

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Simbología	XIV
Tabla 2. Aplicaciones del análisis de elementos en línea	XVIII
Tabla 3. Leyes de minerales	XVIII
Tabla 4 Clasificación de Partículas	3
Tabla 5. Número de mediciones para la calibración de los analizadores del proceso.	11
Tabla 6. Mitad del grosor para agua, cuarzo y pirita para un rango típico de energías de rayos-X.	14
Tabla 7. Cercanía de líneas vecinas $K_{\alpha 1}$ - $K_{\beta 1}$	19
Tabla 8. Tabla de Emisión de Rayos X (Princeton Gamma Tech)	19
Tabla 9. Posibilidades para medir elementos vecinos con líneas K usando un canal-ED con un contador proporcional	22
Tabla 10 Ejemplo de clasificación de Esfalerita con Cribas	44
Tabla 11. Prueba T e Índice de confianza de dos muestras: Comparación de tamaño de partícula P80 obtenidos para cribas e hidrociclones.	46
Tabla 12. Prueba T e Índice de confianza de dos muestras: Comparación del tonelaje por turno obtenidos para cribas e hidrociclones.	47
Tabla 13. Diferencia existente del tamaño de partícula P80 y el tonelaje alimentado entre ambos periodos con cribas e hidrociclones.	48
Tabla 14. Prueba T e Índice de confianza de dos muestras: Comparación de Contenidos metálicos de Plata en dos periodos cribas e hidrociclones.	49
Tabla 15. Prueba T e Índice de confianza de dos muestras: Comparación de Contenidos metálicos de Plomo en dos periodos con cribas e hidrociclones.	51
Tabla 16. Prueba T e Índice de confianza de dos muestras: Comparación de Contenidos metálicos de Zinc en dos periodos con cribas e hidrociclones.	52
Tabla 17. Prueba T e Índice de confianza de dos muestras: Comparación de Contenidos metálicos de Hierro en dos periodos con cribas e hidrociclones.	54
Tabla 18. Prueba T e Índice de confianza de dos muestras: Contenidos metálicos de Cobre en dos periodos con cribas e hidrociclones.	55
Tabla 19 Resumen de las pruebas para los contenidos metálicos.	57
Tabla 20 Prueba T e Índice de confianza de dos muestras: Intensidades de Plata (Ag) en dos periodos con cribas e hidrociclones.	58
Tabla 21 Prueba T e Índice de confianza de dos muestras: Intensidades de Plomo en dos periodos con cribas e hidrociclones.	60
Tabla 22. Prueba T e Índice de confianza de dos muestras: Intensidades de Zinc en dos periodos con cribas e hidrociclones.	62
Tabla 23 Prueba T e Índice de confianza de dos muestras: Intensidades de Hierro en dos periodos con cribas e hidrociclones.	64
Tabla 24. Prueba T e Índice de confianza de dos muestras: Intensidades del canal de sólidos (Scatter) en dos periodos con cribas e hidrociclones.	65
Tabla 25 Prueba T e Índice de confianza de dos muestras: Intensidades del Canal de Plata Background Ag Bg, en los Periodos con cribas y con hidrociclones.	67
Tabla 26. Resultados de las pruebas T para las intensidades.	68
Tabla 27. Correlación de intensidades con los contenidos metálicos.	79
Tabla 28. Prueba T e Índice de confianza de dos muestras: Tamaño de partícula P80 de las muestras de calibración, en los Periodos con cribas y con Hidrociclones.	81
Tabla 29. Resultados estadísticos del modelo de calibración para P80	96
Tabla 30. Resultados estadísticos del modelo de calibración para Plata	99
Tabla 31. Resultados estadísticos del modelo de calibración para Plomo	102

Tabla 32. Resultados estadísticos del modelo de calibración para Zinc.....	104
Tabla 33. Resultados estadísticos del modelo de calibración para Hierro.....	107
Tabla 34. Resultados estadísticos del modelo de calibración para Sólido.....	110
Tabla 35. Especies mineralógicas libres .....	112
Tabla 36. Comparación de longitud máxima del periodo con clasificación de cribas vs hidrociclones. ....	113
Tabla 37. Comparación de longitud mínima del periodo con clasificación de cribas vs hidrociclones. ....	113
Tabla 38. Comparación del diámetro aritmético del periodo con clasificación de cribas vs hidrociclones. ....	114
Tabla 39. Comparación del diámetro de Sauter durante el periodo con clasificación de cribas vs hidrociclones. ....	114
Tabla 40. Comparación de la relación Longitud máxima / Longitud mínima de las partículas durante el periodo con clasificación de cribas vs hidrociclones.....	115
Tabla 41. Comparación de las partículas libres durante el periodo con clasificación de Cribas vs Hidrociclones. ....	116
Tabla 42 Clasificación de Galena con cribas .....	117
Tabla 43 Imágenes de Galena con cribas.....	118
Tabla 44 Clasificación de Galena con Hidrociclones.....	119
Tabla 45 Imágenes de Galena con Hidrociclones.....	119
Tabla 46 Clasificación de Esfalerita con Cribas.....	120
Tabla 47 Imágenes de Esfalerita con cribas .....	121
Tabla 48 Clasificación de Esfalerita con Hidrociclones. ....	122
Tabla 49 Imágenes de Esfalerita con hidrociclones.....	122
Tabla 50 Clasificación de Pirita con cribas.....	123
Tabla 51 Imágenes de Pirita con cribas.....	124
Tabla 52 Clasificación de Pirita con Hidrociclones.....	125
Tabla 53 Imágenes de Pirita con Hidrociclones .....	125
Tabla 54 Comparativa de para identificar la redondez y la forma prismatica de las partículas .....	126

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo de la planta Minera Saucito .....	XIX
Figura 2. Comportamiento de las intensidades de plata con clasificación de Hidrociclones y Cribas de alta frecuencia. ....	1
Figura 3. Influencia de la pulverización en la intensidad de la radiación emitida (Bermúdez 1961) .....	3
Figura 4. Diferentes respuestas posibles para un simple grano de arena (Rawle ,1992).....	4
Figura 5. Diagrama de flujo original, previo a modificación.....	5
Figura 6. Diagrama de flujo posterior a modificación.....	6
Figura 7. Muestreador primario tipo metalúrgico Tipo MSA.....	7
Figura 8. Componentes del Analizador Courier.....	8
Figura 9. Toma de muestra de calibración .....	9
Figura 10. Vista frontal del Multiplexor .....	10
Figura 11. Fluorescencia de rayos X (Courier) .....	12
Figura 12. Análisis FRX en la sonda del analizador (Courier) .....	17
Figura 13. Resolución de detector enfriado de nitrógeno líquido típico.....	18
Figura 14. Entrada Recta de un Hidrociclón .....	26
Figura 15. Hidrociclón (Lynch, 1975) .....	27
Figura 16. Dimensiones de un hidrociclón típico.....	27
Figura 17. Velocidad tangencial.....	29
Figura 18. Velocidad radial.....	29
Figura 19. Trayectoria de las partículas en el Hidrociclón .....	29
Figura 20. Velocidades en el Hidrociclón.....	29
Figura 21. Componentes principales del Stack Sizer (Manual criba Derrick)......	32
Figura 22. Divisor de Flujo (Stack Sizer) .....	33
Figura 23. Alimentador MS estándar (Manual criba Derrick). .....	34
Figura 24. Bastidores de la criba (Manual criba Derrick).....	35
Figura 25. Sistema de esparado de agua (Manual criba Derrick).....	36
Figura 26. Tabla de jerarquías para identificar las variables que influyen en la respuesta de fluorescencia. ....	37
Figura 27. Toma de muestra de calibración .....	38
Figura 28. Muestra compósito.....	39
Figura 29. Proceso de toma de muestra .....	39
Figura 30. Etapas del análisis de las muestras tomadas del analizador de elementos en línea .....	40
Figura 31. Uso de software Outocal .....	41
Figura 32. Ventana de calibración para calibrar el Zinc .....	41
Figura 33. Ejemplo de medición de longitud de un grano (Guía de usuario Nikon NIS-Elements AR) .....	42
Figura 34. La imagen muestra esquemáticamente los puntos de medición de las partículas (Krumbein, 1941). .....	43
Figura 35. Cuadro comparativo de redondez y esfericidad (Powers,1982) .....	43
Figura 36. Proceso análisis de formas.....	44
Figura 37. Procedimiento empleado para realizar pruebas estadísticas de P80 y contenidos metálicos en los dos periodos de clasificación. ....	45
Figura 38. Gráfico de caja del tamaño de partícula P80. ....	46
Figura 39. Histograma del tamaño de partícula P80.....	47
Figura 40. Gráfico de caja del tonelaje por turno.....	47

Figura 41. Histograma del tonelaje del turno. ....	48
Figura 42. Gráfico de caja de Contenidos Metálicos de Plata en dos periodos.....	50
Figura 43. Histograma de Contenidos de Plata en dos periodos. ....	50
Figura 44. Gráfico de caja Contenidos Metálicos de Plomo.....	51
Figura 45. Histograma de Contenidos metálicos de Plomo .....	52
Figura 46. Gráfico de caja de contenidos de Zinc. ....	53
Figura 47. Gráfico Histograma de Contenidos de Zinc. ....	53
Figura 48. Gráfico de caja contenidos metálicos de Hierro en dos periodos .....	54
Figura 49. Gráfico histograma de contenidos Metálicos de Hierro.....	55
Figura 50. Gráfico de caja contenidos metálicos de Cobre en periodo de cribas e Hidrociclones	56
Figura 51. Gráfico Histograma de Contenidos metálicos de Cobre en periodo de cribas e Hidrociclones.	56
Figura 52 Procedimiento empleado para realizar pruebas estadísticas de las intensidades en los periodos de clasificación.....	58
Figura 53. Gráfico de caja de intensidades de Plata. ....	59
Figura 54. Gráfico de Histograma de intensidades de Plata.....	59
Figura 55. Gráfico de caja de intensidades de Plomo. ....	60
Figura 56. Gráfico de Histograma de intensidades de Plomo. ....	61
Figura 57. Gráfico intensidades de Zinc. ....	62
Figura 58. Gráfico de Histograma de intensidades de Zinc .....	63
Figura 59. Gráfico de caja de intensidades de Hierro. ....	64
Figura 60. Gráfico de Histograma de intensidades de Hierro. ....	65
Figura 61. Gráfico de caja de canal de Sólidos. ....	66
Figura 62. Gráfico de Histograma de intensidades de canal Sólidos.....	66
Figura 63. Gráfico de caja de intensidades del canal de Plata background. ....	67
Figura 64. Histograma de intensidades del canal de Plata background .....	68
Figura 65. Gráfico de dispersión de intensidad de Plomo vs Contenidos metálicos de Plomo	69
Figura 66. Gráfico de dispersión de intensidad de Plomo vs Contenidos metálicos de Plomo estratificado por tamaños de partícula. ....	70
Figura 67. Gráfico de dispersión de intensidad de Zinc vs Contenidos metálicos de Zinc	71
Figura 68. Gráfico de dispersión de intensidad de Zinc vs Contenidos metálicos de Zinc estratificado por tamaños de partícula. ....	71
Figura 69 Gráfico de dispersión de intensidad de Hierro vs Contenidos metálicos de Hierro.	73
Figura 70 Gráfico de dispersión de intensidad de Hierro vs Contenidos metálicos de Hierro estratificado por tamaño partícula.....	73
Figura 71. Gráfico de dispersión de intensidad de Plata vs Contenidos metálicos de Plata. 75	75
Figura 72. Gráfico de dispersión de intensidad de Plata vs Contenidos metálicos de Plata estratificado por tamaño partícula.....	75
Figura 73. Gráfico de dispersión de intensidad de Plata Background vs Contenidos metálicos de Plata.	77
Figura 74. Gráfico de dispersión de intensidad de Plata Background vs Contenidos metálicos de Plata estratificado por tamaño partícula.....	77
Figura 75. Procedimiento empleado para realizar pruebas estadísticas de las muestras de calibración en los periodos de cribas e hidrociclones.....	81
Figura 76. Gráfico de caja Tamaño partícula (P80) de las muestras de calibración .....	82

Figura 77. Histograma de tamaño de partícula de las muestras de calibración en el periodo de Cribas e Hidrociclones .....	82
Figura 78. Gráfico de dispersión de la intensidad de Plomo vs % Plomo. ....	83
Figura 79. Gráfico de dispersión de la intensidad de Plomo vs % Plomo estratificado por tamaño partícula. ....	83
Figura 80. Gráfico de dispersión de la intensidad de Zinc vs % Zinc .....	85
Figura 81. Gráfico de dispersión de la intensidad de Zinc vs % Zinc estratificado por tamaño partícula ....	85
Figura 82. Gráfico de dispersión de la intensidad de Hierro vs % Hierro. ....	87
Figura 83. Gráfico de dispersión de la intensidad de Hierro vs % Hierro estratificado por tamaño partícula. ....	87
Figura 84. Gráfico de dispersión de la intensidad de Plata vs gr. Plata/ton .....	89
Figura 85. Gráfico de dispersión de la intensidad de Plata vs gr. Plata/ton estratificado por tamaño partícula. ....	89
Figura 86. Gráfico de dispersión de la intensidad de Plata Background vs gr. Plata/ton ...	91
Figura 87. Gráfico de dispersión de la intensidad de Plata Background vs gr. Plata/ton estratificado por tamaño partícula.....	91
Figura 88. Gráfico de dispersión de la intensidad de Sólido vs % Sólidos.....	93
Figura 89. Gráfico de dispersión de la intensidad de sólido vs % Sólidos estratificado por tamaño partícula. ....	93
Figura 90. Software Outocal con modelo de calibración P80 con Cribas. ....	95
Figura 91. Gráfico de dispersión del modelo de calibración P80.....	95
Figura 92. Software Outocal con modelo de calibración P80 con Hidrociclones.....	96
Figura 93. Gráfico de dispersión del modelo de calibración P80.....	96
Figura 94. Gráfico de dispersión del P80 con el modelo de cribas e hidrociclones.....	97
Figura 95. Software Outocal con modelo de calibración P80 con Cribas. ....	98
Figura 96. Gráfico de dispersión del modelo de calibración P80.....	98
Figura 97. Software Outocal con modelo de calibración Plata con Hidrociclones. ....	99
Figura 98. Gráfico de dispersión del modelo de calibración Plata. ....	99
Figura 99. Gráfico de dispersión de la plata con el modelo de cribas e hidrociclones.....	100
Figura 100. Software Outocal con modelo de calibración Plomo con Cribas. ....	101
Figura 101. Gráfico de dispersión del modelo de calibración Plomo.....	101
Figura 102. Software Outocal con modelo de calibración Plomo con Hidrociclones.....	101
Figura 103. Gráfico de dispersión del modelo de calibración Plomo.....	101
Figura 104. Gráfico de dispersión del plomo con el modelo de cribas e hidrociclones. ...	102
Figura 105. Software Outocal con modelo de calibración Zinc con Cribas. ....	103
Figura 106. Gráfico de dispersión del modelo de calibración Zinc.....	103
Figura 107. Software Outocal con modelo de calibración Zinc con Hidrociclón. ....	104
Figura 108. Gráfico de dispersión del modelo de calibración Zinc.....	104
Figura 109. Gráfico de dispersión del Zinc con el modelo de cribas e hidrociclones. ....	105
Figura 110. Software Outocal con modelo de calibración Hierro con Cribas. ....	106
Figura 111. Gráfico de dispersión del modelo de calibración Hierro.....	106
Figura 112. Software Outocal con modelo de calibración Hierro con Hidrociclón. ....	107
Figura 113. Gráfico de dispersión del modelo de calibración Hierro.....	107
Figura 114. Gráfico de dispersión del Hierro con el modelo de cribas e hidrociclones... ..	108
Figura 115. Software Outocal con modelo de calibración Sólidos con Cribas.....	109
Figura 116. Gráfico de dispersión del modelo de calibración Sólidos. ....	109
Figura 117. Software Outocal con modelo de calibración Sólidos con hidrociclón. ....	110
Figura 118. Gráfico de dispersión del modelo de calibración Sólidos. ....	110
Figura 119. Gráfico de dispersión del Sólido con el modelo de cribas e hidrociclones... ..	111

Figura 120 Procedimiento empleado para realizar pruebas estadísticas para evaluar la forma en los dos periodos de clasificación con Cribas e Hidrociclones.....	112
Figura 121 No.2277-3 Galena $D_{(3,2)}$ 10 $\mu$ m R-Lmax/Lmin 6 .....	118
Figura 122 No. 388-04 Galena $D_{(3,2)}$ 10 $\mu$ m R-Lmax/Lmin 1.....	118
Figura 123 378-05 Galena $D_{(3,2)}$ 70 $\mu$ m R-Lmax/Lmin 1 .....	118
Figura 124 No. 1726-1 Galena $D_{(3,2)}$ 10 $\mu$ m R-Lmax/Lmin 3 .....	119
Figura 125 No. 2504-4 Galena $D_{(3,2)}$ 40 $\mu$ m R-Lmax/Lmin 3 .....	119
Figura 126 No. 2532-2 Galena $D_{(3,2)}$ 10 $\mu$ m R-Lmax/Lmin 1 .....	120
Figura 127 No. 1577-02 Galena $D_{(3,2)}$ 40 $\mu$ m R-Lmax/Lmin 1.....	120
Figura 128 No. TS408 3 Esfalerita $D_{(3,2)}$ 20 $\mu$ m R-Lmax/Lmin 7 .....	121
Figura 129 No. TS979-01 Esfalerita $D_{(3,2)}$ 20 $\mu$ m R-Lmax/Lmin 2 .....	121
Figura 130 No. 423-05 Esfalerita $D_{(3,2)}$ 70 $\mu$ m R-Lmax/Lmin 2.....	121
Figura 131 No. 1768-1 Esfalerita $D_{(3,2)}$ 20 $\mu$ m R-Lmax/Lmin 7.....	122
Figura 132 No. 1612-2 Esfalerita $D_{(3,2)}$ 20 $\mu$ m R-Lmax/Lmin 7.....	123
Figura 133 No. 448-05 Pirita $D_{(3,2)}$ 20 $\mu$ m R-Lmax/Lmin 10.....	124
Figura 134 No. 378-3 Pirita $D_{(3,2)}$ 20 $\mu$ m R-Lmax/Lmin 1 .....	124
Figura 135 No. 463-4 Pirita $D_{(3,2)}$ 70 $\mu$ m R-Lmax/Lmin 7 .....	124
Figura 136 No. 1598-2 Pirita $D_{(3,2)}$ 10 $\mu$ m R-Lmax/Lmin 7 .....	125
Figura 137 No. 1775-2 Pirita $D_{(3,2)}$ 60 $\mu$ m R-Lmax/Lmin 7 .....	125
Figura 138 No. 1651-1 Pirita $D_{(3,2)}$ 10 $\mu$ m R-Lmax/Lmin 1 .....	126
Figura 139 No. 2504-3 Pirita $D_{(3,2)}$ 60 $\mu$ m R-Lmax/Lmin 1 .....	126



## SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES USADAS

Se han usado varios símbolos en los ejemplos y ecuaciones cuyo significado es explicado en la tabla a continuación.

Tabla 1. Simbología

Ac	Acantita $\text{Ag}_2\text{S}$
As	Arsénico
Ag	Plata
C,	C% Ensayo de laboratorio de un elemento o mineral. Generalmente el ensayo es realizado en una muestra preparada por métodos más exactos que el ensayo del proceso.
Cave	El promedio de los análisis de laboratorio en un conjunto de datos.
C?	Un ensayo del elemento, también llamado estimado de la concentración, calculado usando una ecuación de calibración de las intensidades de los rayos-X medidos por el analizador del proceso.
Ccp	Calcopirita $\text{CuFeS}_2$
CI	Intervalo de confianza
Cu	Cobre
$d_{\max}$	Longitud máxima de la esfera
$d_{\min}$	Longitud mínima de la esfera
$d_s$	Superficie de la esfera
$d_{\text{sed}}$	Esfera que tiene la misma tasa de alimentación
$d_{\text{sieve}}$	Esfera que pasa por la misma apertura del tamiz
$d_v$	Esfera del mismo volumen
$d_w$	Esfera del mismo peso
E, A, B	Símbolos generales de los elementos (como Fe, Cu, etc.)
E	Es también usado como la energía de una línea de rayos-X
ED	Energía dispersiva
EDFRX	Energía dispersiva de fluorescencia de rayos X
FRX	Fluorescencia de rayos X
Fe	Hierro
g/t	Gramos por toneladas
Gn	Galena $\text{PbS}$
$H_0$	Hipótesis nula
$H_1$	Hipótesis alternativa
$K_{\alpha 1}$ $K_{\beta 1}$	Líneas de emisión de rayos X
$\lambda$	Longitud de onda de una línea de rayos-X

$\mu$ (1)	Media de prueba T 1
$\mu$ (2)	Media de prueba T 2
$\mu$ [f]	Coefficiente de absorción de masa Fluorescencia
$\mu$ [scC]	Coefficiente de absorción de masa Compton o dispersión incoherente
$\mu$ [scR]	Coefficiente de absorción de masa Rayleigh o dispersión coherente
$\mu$ [tot]	Coefficiente de absorción de masa total
MSA	Metallurgical Sampling Accounting por sus siglas en Inglés, su traducción al español Contabilidad de muestreo metalúrgico.
N	Símbolo general para la intensidad de los rayos-X fluorescentes normalizados. Intensidades como estas son usadas como variables independientes en las ecuaciones de calibración.
N[E]	La intensidad fluorescente del elemento E o la intensidad de difracción del mineral E.
N[bg]	La intensidad de la radiación de fondo cercana a la línea fluorescente o de difracción.
N[sc]	La dispersión (frecuentemente dispersión Compton) de una línea principal en el espectro del tubo de rayos-X o fuente de isótopos.
N[scC]	Compton que es intensidad de dispersión incoherente.
N[scR]	Rayleigh que es intensidad de dispersión coherente.
NEMA 4X	NEMA es el acrónimo de Asociación Nacional de fabricantes de electrónica (por sus siglas en inglés: National Electrical Manufacturers Association). Esta organización ofrece gabinetes de componentes eléctricos en calificaciones, como NEMA 4X, basadas en sus cualidades protectoras. NEMA especifica si un gabinete de componentes eléctricos es seguro para su uso en exteriores, y qué tipo de condiciones ambientales pueden soportar.
Pb	Plomo
Pg	Pirargirita $Ag_3SbS_3$
Po	Pirrotita $Fe_{(1-x)}S$
Pr	Proustita $Ag_3AsS_3$
Py	Pirita $FeS_2$
R-Lmax/Lmin	Relación Longitud Máxima/Longitud mínima
r	Coefficiente de correlación
R (0,1,2..6)	Coefficientes de Regresión parámetros de la ecuación de ensayos calculados por análisis de regresión.
Sp	Esfalerita (Zn, Fe) S
StDev	Desviación estándar
$\epsilon$	El error de los cálculos de ensayo, es decir C-C%.
s	Contenido de sólidos de una pulpa (estrictamente, porcentaje en peso de sólidos en una pulpa).
s?	Estimado del analizador de rayos X del proceso, calculado usando una ecuación de calibración de intensidades de rayos X medidos por el analizador del proceso.
SL	Slurry (pulpa)

T	Tiempo de medición.
t	Longitud de penetración micrómetros
tpa	Toneladas por año
tpd	Toneladas por día
v	Concentración de volumen de sólidos en la pulpa como porcentaje.
$V_R$	Velocidad Radial
$V_T$	Velocidad tangencial
$V_v$	Velocidad vertical
WD	Longitud de onda (por las siglas en inglés: Wave Length)
WDXRF	Longitud de onda de Fluorescencia de rayos X
Z	Numero atómico
Zn	Zinc

## INTRODUCCIÓN

### RESUMEN

Los analizadores de elementos en línea por fluorescencia de rayos X (FRX), ahora son instrumentos comunes en muchas operaciones mineras en todo el mundo. Un analizador con estas características brinda a cualquier sitio minero, la capacidad de obtener datos representativos en tiempo real sobre el contenido de metales valiosos presentes en el mineral que se procesa. Las estrategias operativas, particularmente en el control de reactivos en el circuito de flotación, se pueden construir en torno a los contenidos de metales medidos en línea mediante por un analizador FRX. El buen rendimiento y la calidad de la información se dan por sentado en las operaciones mineras donde se implementan buenas prácticas de mantenimiento. Sin embargo, la medición en línea es sensible a los parámetros operativos, como el rendimiento del circuito, el tamaño de partícula en la molienda y el grado de alimentación.

Este trabajo de tesis presenta los resultados de una investigación sobre el desempeño de un analizador en línea instalado en un circuito de molienda operado con diferentes configuraciones de clasificación, que van desde el tamizado ultrafino hasta un arreglo con hidrociclones. Los datos operativos se utilizaron junto con el análisis de imágenes de los minerales para comprender mejor la influencia de ambas configuraciones de clasificación en las mediciones generadas por un analizador FRX en línea. Se presenta la influencia del tonelaje de alimentación, el grado de alimentación, la forma y el tamaño de las partículas en la intensidad de la señal del analizador FRX para plata, galena y esfalerita.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han desarrollado e implementado tecnologías para hacer más eficientes los procesos de concentración de minerales, lo cual ha contribuido a incrementar la capacidad de molienda y consecuentemente la recuperación de valores; además las unidades mineras están empleando analizadores de elementos en línea, por medio de la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX) para el monitoreo y el control de los procesos en tiempo real, esto ha permitido optimizar los insumos para incrementar las recuperaciones de metales como la plata.

La tecnología de FRX en línea es comúnmente utilizada para medir directamente los elementos como Arsénico (As), Plata (Ag), Plomo (Pb), Níquel (Ni), Hierro (Fe), Cobre (Cu) y Zinc (Zn) en suspensión acuosa. Como documenta Rantaharju (2022)<sup>i</sup> en su publicación en la página web del proveedor Metso Outotec, existen diversas aplicaciones enfocadas a optimizar el procesamiento de minerales, donde la medición directa de estos elementos es de gran interés. A continuación, en la Tabla 2 se muestran algunos ejemplos:

Tabla 2. Aplicaciones del análisis de elementos en línea

<b>Aplicación</b>	<b>Justificación</b>	<b>Elementos de Interés</b>
Concentración de minerales de Plata Plomo y Zinc	Control de Flotación y control de adición de reactivos	Ag, Pb y Zn
Concentración de Minerales de Hierro	Control de Flotación	Fe
Concentración de minerales de cobre	Control de Flotación	Cu

En casos específicos, la FRX en línea proporciona información del contenido de los elementos de los productos intermedios, mediante un análisis indirecto basado en la medición de los elementos más pesados. Sin embargo, cuando la correlación del elemento de interés con el elemento directamente medido es pobre y la medición cuenta con la precisión requerida, es necesario realizar la calibración del equipo.

La investigación se llevó a cabo en la Minera Saucito, ubicada en el municipio de Fresnillo en el estado de Zacatecas. Esta unidad es propiedad del grupo Fresnillo PLC y se encuentra en operación desde el año 2011, los productos básicos que se extraen de la mina subterránea son Plata (Ag), Oro (Au), Plomo (Pb) y Zinc (Zn). Cuentan con una capacidad de molienda de 7,800 tpd ó 2,600,000 tpa<sup>ii</sup>. Las leyes de minerales de cabeza se describen en la Tabla 3.

Tabla 3. Leyes de minerales

Plata Ag (g/t)	178
Oro Au (g/t)	1.36
Plomo Pb (%)	1.01
Zinc Zn (%)	1.69

Inicialmente la planta concentradora inició un circuito de molienda primaria SAG y molienda secundaria con molino de bolas, con un circuito de clasificación de hidrociclones. Como se muestra en la Figura 1, en el año 2014 se implementó un sistema de clasificación con ocho módulos apilados de cinco cribas de alta frecuencia como reemplazo de hidrociclones para incrementar la capacidad de mineral procesado.

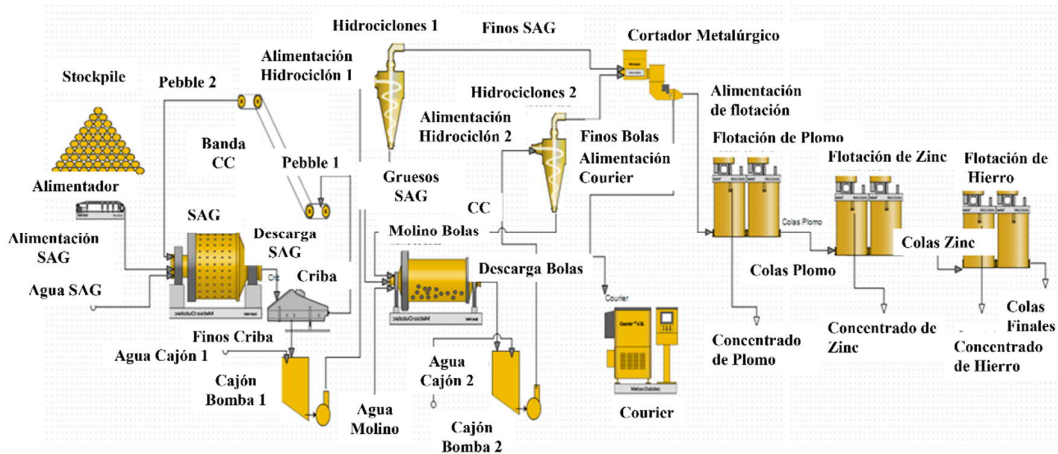


Figura 1. Diagrama de flujo de la planta Minera Saucito

La consecuencia natural de implementación fue la generación de un producto de molienda más grueso. La planta está equipada con un analizador de elementos en línea (Courier), con el cual se realizan ensayos de elementos en línea para el control del proceso. Dicho analizador estaba calibrado y ajustado a la operación de planta con hidrociclones. Posterior a la puesta en marcha de las cribas de alta frecuencia, el equipo de operación observó una variación significativa en las mediciones reportadas por el Courier.

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo con el objetivo de:

- Identificar el impacto de la forma y tamaño de partícula en las intensidades del analizador de elementos en línea (Courier),
- Optimizar la operación de flotación y disminuir la diferencia en los ensayos del laboratorio y el Analizador de elementos en línea (Courier).

Este trabajo concentra la documentación y los resultados de la investigación metalúrgica en el laboratorio de la planta Minera Saucito. Se utilizaron las técnicas de caracterización por microscopía óptica y análisis de tamaño de partícula para determinar su influencia en las mediciones de intensidades de los elementos medidos.

## CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN PARA DETERMINAR EL EFECTO DE FORMA Y TAMAÑO DE PARTÍCULAS EN LA MEDICIÓN DE INTENSIDADES DE UN ANALIZADOR DE ELEMENTOS EN LÍNEA

### 1.1. Justificación

Minera Saucito ubicada en la ciudad de Fresnillo Zacatecas tiene una planta de concentración de Plata, Plomo, Hierro y Zinc que cuenta con un alto grado automatización y utiliza analizadores de elementos en línea (Courier) para controlar los circuitos de flotación Plata-Plomo y Zinc. Lo anterior se realiza enlazando los analizadores con su sistema experto. El sistema experto modifica variables tales como el flujo de aire, cama de espuma y la dosificación automática de reactivos.

Posterior a la instalación de las cribas de alta frecuencia, Minera Saucito detectó diferencias entre las mediciones de muestras de compósitos de turnos generadas en función del sistema de clasificación en operación (hidrociclones o cribas). Dichas diferencias significativas entre los resultados del analizador Courier y los ensayos de laboratorio, tienen el potencial de impactar en el control correcto del proceso y disminuir la recuperación final de los minerales de interés.

Al utilizar cada uno de los dos sistemas de clasificación con que se cuenta, se presenta un cambio de la forma y del tamaño de la partícula, lo cual ocasiona incertidumbre en las intensidades de composición de los elementos, ya que se observa una diferencia importante entre los resultados obtenidos a partir del modelo actual del Analizador de elementos (Courier) y del laboratorio de análisis químico.

La Figura 2 presenta el comportamiento de las intensidades de plata en el analizador de elementos (Courier) cuando la clasificación se lleva a cabo con hidrociclones o cribas de alta frecuencia. Se puede observar, que cuando se realizó el cambio en la operación de hidrociclones a cribas de alta frecuencia, las intensidades del canal de plata disminuyeron significativamente.

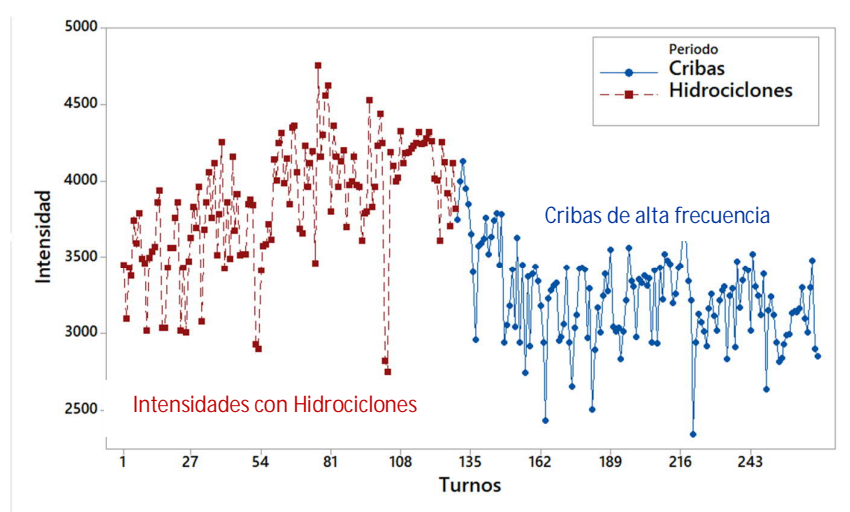


Figura 2. Comportamiento de las intensidades de plata con clasificación de Hidrociclones y Cribas de alta frecuencia.

## 1.2. Hipótesis

Al identificar cómo la forma y tamaño de partícula de las variables impactan en la medición de las intensidades del Analizador de elementos en línea (Courier), permitirá obtener un mejor modelo multivariable uniforme, en donde las concentraciones analizadas de Plata, Plomo y Zinc sean más aproximadas a la realidad.

## 1.3. Objetivo general

Estudiar el efecto que ocasionan la forma y tamaño de partícula en las intensidades de los elementos de interés, como Plata, Plomo y Zinc, en un analizador de elementos en línea (FRX) para determinar el impacto en la medición de concentraciones de elementos.

## 1.4. Objetivos específicos

- Evaluar el comportamiento del tamaño de partícula, tonelaje por turno y contenidos metálicos, comparando la utilización de cribas contra hidrociclones.
- Determinar el tamaño de las partículas provenientes de un sistema de clasificación de Hidrociclones y de Cribas de alta frecuencia.
- Evaluar el impacto del tamaño de partícula en la medición con un Analizador de elementos en línea.
- Correlacionar el tamaño de partícula con las intensidades que refleja el analizador de elementos en línea (Courier).
- Elaborar modelo de calibración multivariable para los elementos de interés y compararlo con el tipo de clasificación.
- Evaluar el impacto de la morfología en la medición con un Analizador de elementos en línea.
- Identificar la forma de las partículas que resultan a partir de Cribas de alta frecuencia y de un Hidrociclón.

## 1.5. Antecedentes de la investigación

Los analizadores de elementos en línea Courier fueron desarrollados para analizar en línea los elementos químicos en la industria Química y Minera en tiempo real. Algunos trabajos han descrito su funcionamiento, calibración, optimización de procesos y control de calidad de concentrados, por ejemplo, en el artículo “Application of X-Ray fluorescence analysis to process control<sup>iii</sup>”, donde se expone la relación entre las intensidades de fluorescencia y los tamaños de partícula (Bernstein, 1961) ó en proyecto de título “Análisis de lecturas del analizador Courier para aumentar la confiabilidad en la planta concentradora Minera Centinela<sup>iv</sup>” donde recalca cómo asegurar una lectura confiable es fundamental para tener un control de calidad eficaz del proceso (Vilches, 2020).



Las intensidades de fluorescencia en conjunto con el resultado químico del laboratorio, son utilizadas en un modelo lineal para determinar el porcentaje del elemento medido en la muestra, como también se describe en la tesis “Proyecto para incrementar la capacidad de operación de la planta de beneficio, Compañía Minera La Negra<sup>v</sup>” (Gaspar, 2013).

En el estudio “Aplicación a la determinación de uranio en minerales<sup>vi</sup>”, utilizando un espectrómetro "Norelco" de la casa Philips Electronics Inc., New York, U.S. A., tipo n2. 52260, se hace referencia a las interferencias del tamaño de partícula en la fluorescencia de rayos X, el cual reveló que, como parte de la preparación óptima de muestra, se requiere pulverizar a diferentes tiempos para encontrar que después de 30 minutos, la intensidad tiende a ser constante, como se observa en la Figura 3 (Bermúdez, De la Cruz, Fernández, 1961).

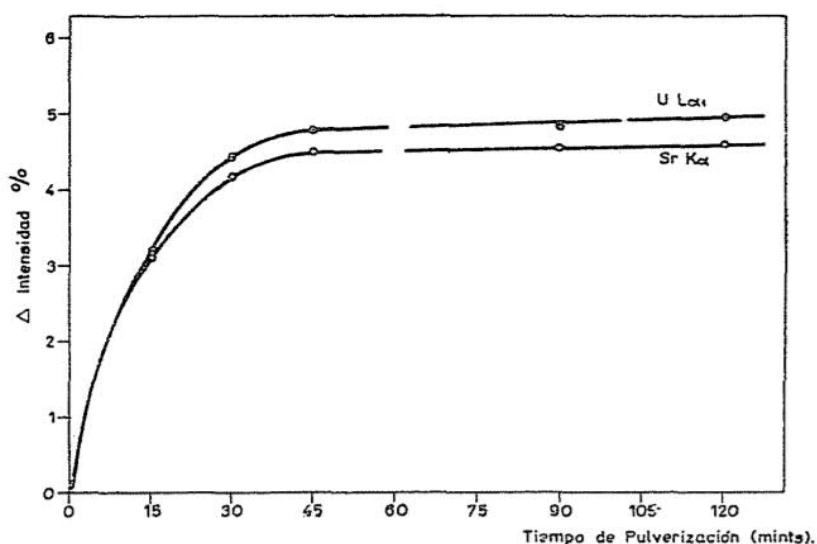


Figura 3. Influencia de la pulverización en la intensidad de la radiación emitida (Bermúdez 1961)

Los analizadores de tamaño de partícula que basan su funcionamiento bajo el principio de medición laser, utilizan modelos matemáticos para determinar el tamaño de partícula. En el pasado, se asumía que las partículas eran esféricas para facilitar su análisis. Tras el inicio de estudios para detectar la variabilidad de estos analizadores, se utilizó también la microscopía óptica para identificar si existía alguna influencia asociada a la forma de las partículas en la medición, en el artículo técnico “Principios básicos del análisis de tamaño de partículas” de Rawle (2003)<sup>vii</sup>, se reporta la influencia en la medición de la morfología de las partículas.

En la Tabla 4, se clasifican las partículas de acuerdo a su morfología como angulares, sub angulares o muy angulares.

Tabla 4 Clasificación de Partículas

Esfericidad	Angular	Redondeada
Baja esfericidad	Subangular	Sub redondeada
Media esfericidad	Angular	Redondea
Alta esfericidad	Muy angular	Muy Redondea

Se determinó que las partículas provenientes de un proceso de reducción de tamaño y clasificación tenían más de una forma que se acercan o alejan a una esfericidad. La forma de las partículas puede influir en el tamaño de partícula dependiendo del punto donde sea medida.

La Figura 4 muestra cómo el diámetro de una misma partícula puede clasificarse de diferente forma dependiendo de cómo es medida.

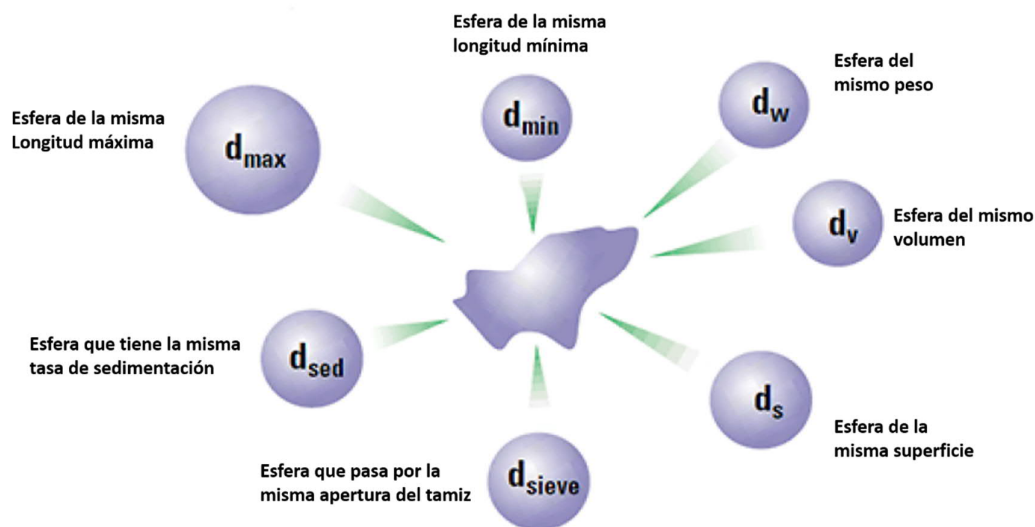


Figura 4. Diferentes respuestas posibles para un simple grano de arena (Rawle ,1992)

En el funcionamiento del analizador de elementos en línea, la cantidad de un elemento en una muestra es directamente proporcional a la intensidad de fluorescencia detectada por el equipo, sin embargo, éste no toma en cuenta el impacto del tamaño de partícula y la morfología de las partículas en el resultado entregado.

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO DE FUNCIONAMIENTO DEL ANALIZADOR DE ELEMENTOS EN LÍNEA, CRIBAS E HIDROCICLONES.

### 2.1. Introducción

Originalmente el circuito de molienda de Minera Saucito constaba de dos circuitos de molienda por planta, un molino SAG, un molino de bolas, dos baterías de hidrociclones, una para el molino SAG con tres hidrociclones tipo Gmax tamaño 10" y una batería con ocho hidrociclones tipo Gmax tamaño 15", un cortador metalúrgico, un analizador de elementos en línea de 6 flujos y 32 celdas de flotación (Figura 5). El diagrama de flujo original muestra la delimitación con color rojo donde el presente trabajo de tesis se va a trabajar.

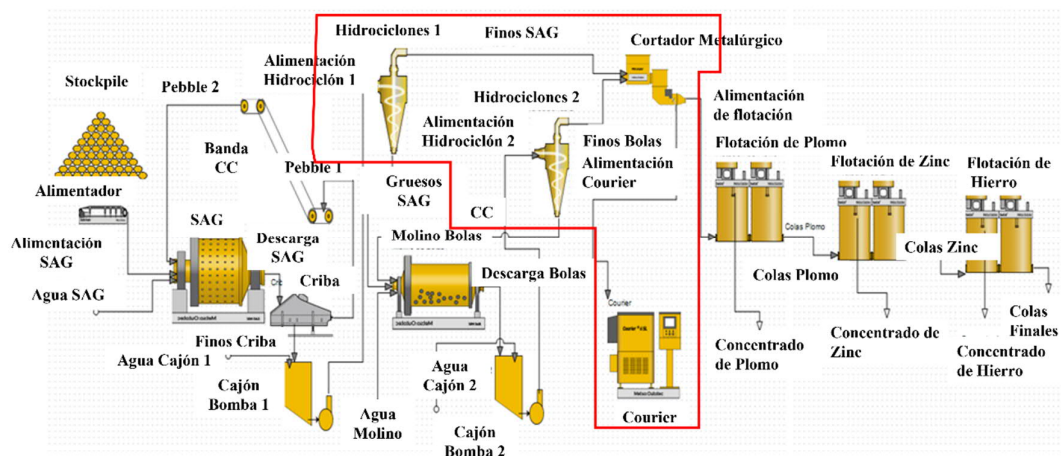


Figura 5. Diagrama de flujo original, previo a modificación, la delimitación con color rojo muestra el área de trabajo.

Como parte de las mejoras para incrementar la capacidad de molienda, se tomó la decisión de reemplazar la batería de hidrociclones circuito de molienda de bolas por una batería de cribas que constaba de 8 juegos con 5 cribas cada una (Figura 6). Sin embargo, a pesar de tener las mismas leyes, las intensidades reportadas por el analizador de elementos en línea disminuyeron considerablemente ocasionado en consecuencia que las lecturas de contenido de Plata disminuyesen también.

Al regresar a un sistema de clasificación con hidrociclones, las intensidades del canal de plata en el analizador de elementos en línea cambiaron y es que nace el interés por estudiar este comportamiento y cómo es que el tamaño de partícula impacta directamente en los resultados entregados por el analizador de elementos en línea.

Para entender la relación tan estrecha que guardan el analizador de elementos en línea con los sistemas de clasificación como cribas o hidrociclones, primeramente, se debe conocer el funcionamiento de cada uno de ellos.

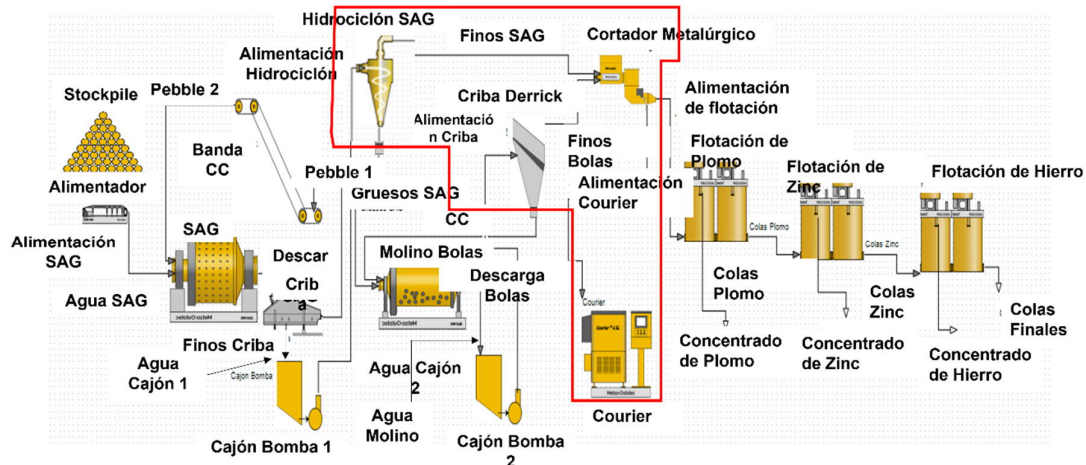


Figura 6. Diagrama de flujo posterior a modificación, la delimitación con color rojo muestra el área de trabajo.

## 2.2. Descripción del Sistema analizador de elementos en línea

El principio físico con el que opera este equipo está basado en la fluorescencia de rayos X, y de manera general, los resultados obtenidos pueden, ser altamente confiables dentro del campo minero-metalúrgico.

### 2.2.1. Partes del analizador

Se presenta un análisis fundamental del sistema de control y los beneficios que trae su uso<sup>viii</sup>. Los principales componentes del analizador de elementos en línea son los siguientes:

- Sistema de muestreo Primario
- Sistema de muestreo Secundario
- Sonda – Analizador

### 2.2.2. Muestreo primario

El primer componente de importancia es el sistema de muestreo primario. El sistema de muestreo primario dirige una parte del flujo de proceso al equipo de multiplexión para el sistema de muestreo secundario de seis líneas.

Existe una gama de dispositivos de muestreo primario, para diferentes aplicaciones, en la elaboración de este trabajo se utilizó un muestreador metalúrgico tipo MSA, el cual es utilizado para obtener muestras metalúrgicas confiables que representen las variaciones que ocurren en la distribución de tamaño de partícula, las concentraciones de elementos y el flujo de sólidos (Figura 7).

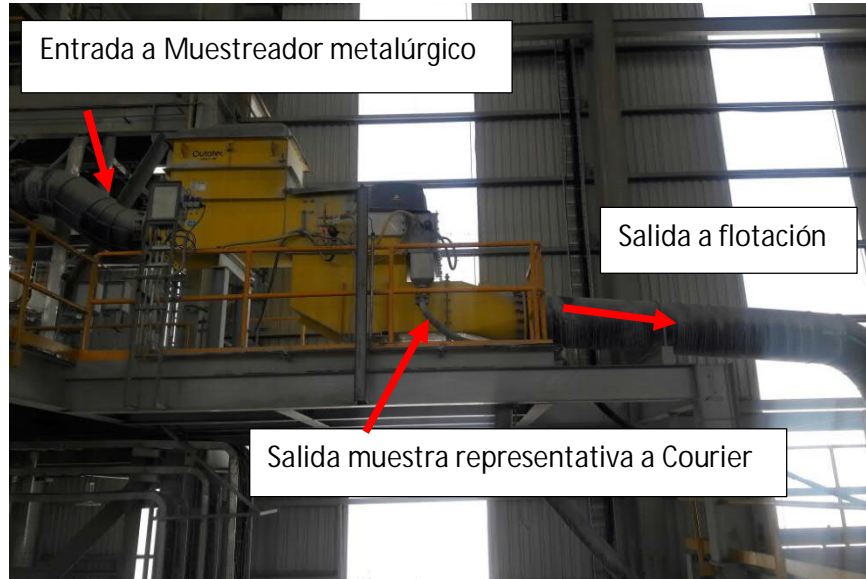


Figura 7. Muestreador primario tipo metalúrgico Tipo MSA.

Los modelos Courier® del analizador de elementos en línea, generalmente permiten la alimentación de flujos de muestra por gravedad, sin necesidad de bombeo. También es posible obtener pequeños flujos de muestra directamente del sistema de muestreo secundario del analizador sin necesidad de un muestreo previo por parte del laboratorio.

Dependiendo de los requerimientos de proceso, el flujo de muestra primaria puede ser continuo, con o sin lavado periódico automático. Como alternativa, se puede interrumpir la alimentación del flujo, para efectuar un lavado automático de la línea de proceso entre muestras para evitar contaminación de los diferentes flujos. Hoy en día las características de muestreo controlado ofrecen una gran flexibilidad para el usuario, ya que le permiten programar el muestreo de los diferentes puntos del proceso de acuerdo a las necesidades de la unidad minera.

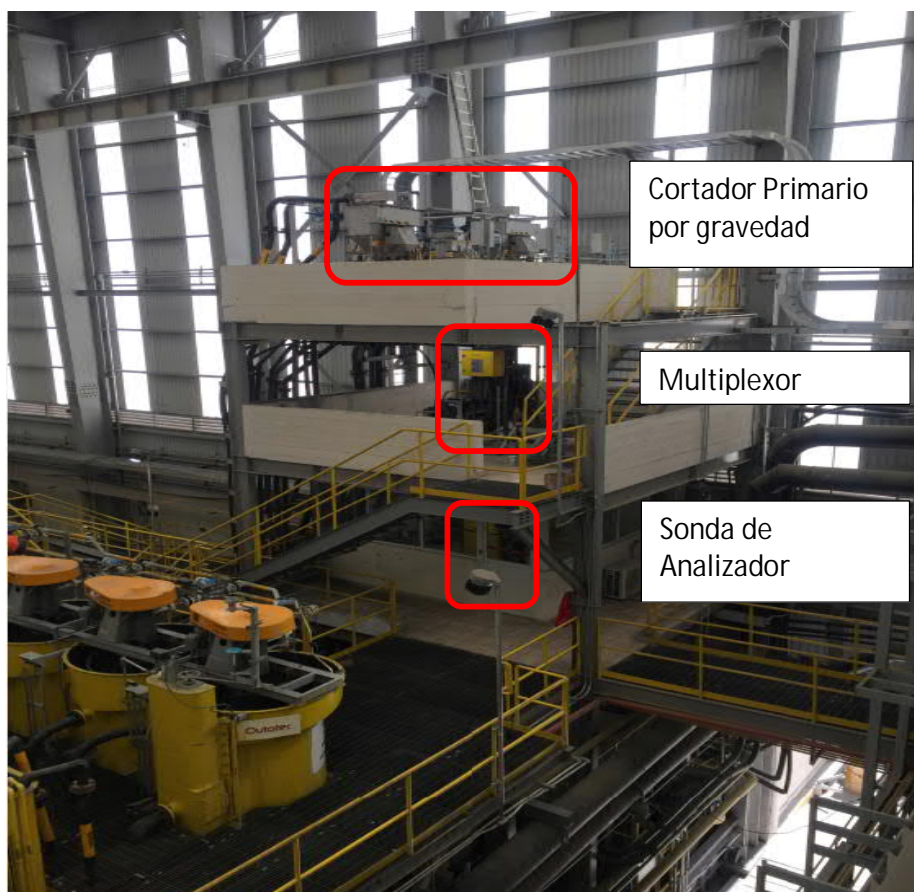


Figura 8. Componentes del Analizador Courier

### 2.2.3. Control del analizador

El panel de control de la sonda del analizador Courier® SL (Slurry) posee un terminal gráfico, donde se despliegan las mediciones más recientes y el estado del analizador, complementado por interruptores de control y luces indicadoras. El mismo gabinete aloja los módulos de interfaz y de control para el monitoreo y control del sistema de muestreo primario y secundario.

### 2.2.4. Demultiplexión

Para evitar la contaminación de cada uno de los flujos analizados, se puede utilizar una demultiplexión para re direccionarlos a la línea de proceso correspondiente.

### 2.2.5. Medición

La sonda del analizador Courier® combina el método de medición de fluorescencia de rayos X por dispersión de longitud de onda de alto rendimiento y el método económico de medición de fluorescencia de rayos X por dispersión de energía, de una manera singular y eficaz en cuanto a costos. El analizador posee una medición de referencia automática para

finde de estabilidad de los instrumentos y de auto-diagnóstico. La sonda del analizador contiene los componentes analíticos esenciales dentro de un cierre de acero inoxidable protector IP56 diseñado para cumplir con los requerimientos de protección NEMA 4X.

El grado de protección comprende un conjunto de estándares creados por la National Electrical Manufacturers Association (NEMA) o Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos, que brindan los estándares más comunes en las especificaciones de equipos eléctricos y electrónicos.

Cabe destacar, que la asociación no ensaya ni certifica los productos, simplemente hace referencia a la protección de personas contra el contacto involuntario con objetos del equipo, además de la protección frente a influencias externas sobre un gabinete.

El grado de protección NEMA 4X certifica un gabinete para su instalación interior o exterior, protege contra el polvo transportado por el viento y la lluvia, salpicaduras de agua, agua proyectada y corrosión; además protege contra daños ocasionados por la formación de hielo exterior sobre el armario.

### 2.2.6. Muestreo de calibración

El dispositivo de muestreo de calibración incorporado ayuda al operador a extraer una muestra verdaderamente representativa y posible de repetir a partir de la pulpa medida para fines de análisis comparativos de laboratorio (Figura 9). Los datos de calibración pueden ser leídos desde el analizador y enviados al software de calibración Outocal de la estación administradora.



Figura 9. Toma de muestra de calibración

### 2.2.7. Muestreo secundario

El flujo total de la muestra primaria es regulado por una manguera de muestra activada por un cilindro de aire. El mismo cilindro transporta la manguera en la otra dirección a través de

una cortadora de intervalos programables con el fin de recolectar una muestra compuesta representativa (Figura 10).

La basura es removida de las muestras por mallas auto - limpiadoras y el aire atrapado es reducido a un mínimo dentro de un estanque de nivel controlado. El estanque entrega un flujo de muestra estable a la celda de flujo del analizador. La disponibilidad de muestra primaria y la velocidad de flujo se monitorean para fines de diagnóstico.

La operación de multiplexión está diseñada para reducir al mínimo los tiempos de permutación de muestra en sistemas grandes. Mientras una muestra todavía está siendo medida en un dispositivo de multiplexión, la próxima muestra ya está siendo acondicionada en la segunda unidad de multiplexión, permitiendo así un ciclo de medición rápido para todos los flujos.

La secuencia de medición es totalmente programable. Por ejemplo, los flujos críticos pueden ser medidos con mayor frecuencia y puede usarse un tiempo de medición mayor para flujos de relaves. El tiempo de intercambio de muestras se utiliza para mediciones de referencia internas, las que se utilizan para fines de monitoreo y de compensación automática de desplazamiento.

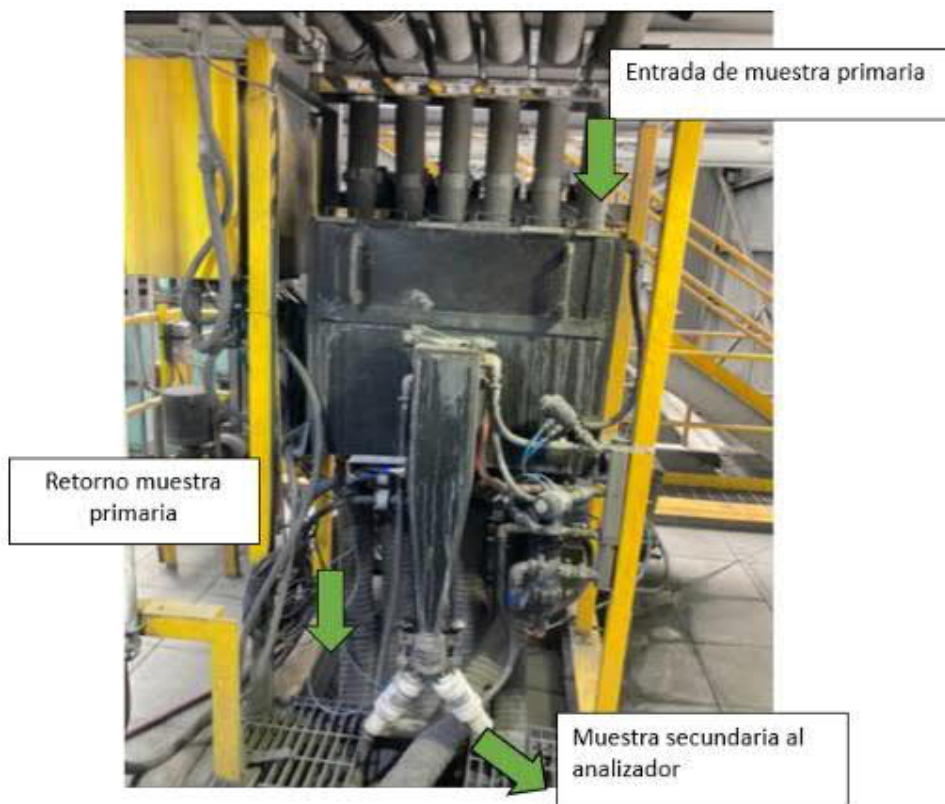


Figura 10. Vista frontal del Multiplexor

La recolección de muestras compuestas de todos los flujos es una característica estándar del sistema de multiplexión. Una unidad de filtro opcional seca las muestras compuestas.



### 2.2.8. Calibración

El principio básico de los analizadores de fluorescencia de rayos-X (FRX) es excitar los electrones que emitirán los rayos-X característicos de los elementos en la muestra y medir las intensidades de la radiación subsecuente. La energía (o longitud de onda) de esa radiación determina extraordinariamente de que elemento es derivada. La intensidad de la radiación es directamente dependiente de la concentración del elemento.

Desafortunadamente, la cantidad de otros elementos en la muestra, pulpas de minerales, composición del mineral y distribución de tamaño de partículas, también influirán en la intensidad del elemento, aunque en un grado menor.

Lo anterior constituye el origen de los efectos entre elementos o interferencias, por lo cual el método de correlación empleado por el analizador, que se explica a detalle en el siguiente capítulo, para calcular las concentraciones de intensidades medidas puede tender a complicarse.

La calibración siempre comprende de dos actividades simultáneas:

1. Colección de información, que implica la medición de las intensidades de los rayos-X de las muestras de las corrientes provenientes de los muestreadores primarios hacia el analizador en línea, tomando una muestra de calibración física y analizando está en el laboratorio para las concentraciones de interés.
2. Determinación de la ecuación de calibración usando el software de análisis de regresión Outocal. (Se pueden usar otros análisis de regresión, pero se requiere mucho más trabajo y habilidad para usarlo).

### 2.2.9. Cantidad de muestras requeridas para la calibración

Cuántas mediciones realizar depende de cuántos elementos interaccionan, es decir, interfieren con el análisis de los otros. Usualmente la mayoría de los metales con una concentración absoluta mayor que  $\pm 1\%$  interferirá con la medición de otros elementos.

El número de mediciones para una buena calibración está definido en la Tabla 5. Para la primera calibración usada en el control del proceso se tomarán 15 mediciones.

Tabla 5. Número de mediciones para la calibración de los analizadores del proceso.

Número de elementos interactuantes	Numero de mediciones requeridas
1	15
2	20
3	30
4	40

### 2.2.10. Interacción de los Rayos -X

Como se detalla en el Manual de calibración de pulpa Courier<sup>ix</sup> Cuando un Rayo-X (por ejemplo, de un tubo de Rayos-X) de una cierta energía E golpea a un átomo de un elemento de número atómico Z en una muestra e interacciona con éste, existe la posibilidad que se

produzcan cinco procesos de interacción diferentes, de los cuales en nuestro caso tenemos que considerar tres (Figura 11).

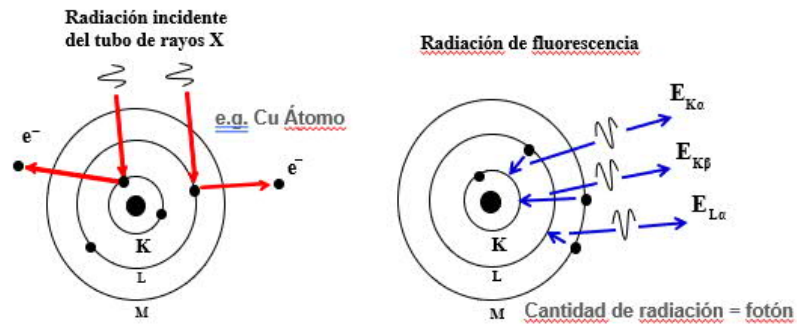


Figura 11. Fluorescencia de rayos X (Courier)

- **Dispersión Rayleigh o dispersión coherente.** El rayo-X incidente rebota en una dirección diferente sin cambiar de energía. La probabilidad de que ocurra se describe por el coeficiente de absorción de masa  $\mu[\text{scR}]$ . Esto es como la bola de billar que golpea la pared de la mesa.
- **Dispersión Compton o dispersión incoherente.** El rayo-X incidente rebota en una dirección diferente y pierde algo de su energía pasándola a un electrón con un enlace débil. La energía del rayo-X emergente se reduce, lo cual significa que la longitud de onda del rayo-X incrementa. La probabilidad de interacciones de este rayo-X se describe por el coeficiente de absorción de masa  $\mu[\text{scC}]$ .

El cambio en longitud de onda de la línea Compton es:

$$\Delta\lambda = 0.0243\text{\AA} \cdot (1 - \cos\phi), \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde  $\phi$  es el ángulo de cambio en la dirección del rayo-X en un proceso de dispersión. Los espectrómetros de cristal Courier tienen un ángulo de dispersión bastante bien definido y dan un pico Compton bien-definido. El cambio en longitud de onda es aproximadamente  $0.04 \text{\AA}$ .

$$E(\text{keV}) = 12.4/\lambda(\text{\AA}) \quad \text{Ecuación 2.}$$

La ecuación 2 para cambiar de longitud de onda del rayo-X a energía. Observe que mientras el cambio en longitud de onda es constante en el proceso Compton, el cambio en energía es muy pequeño para energías pequeñas  $< 10 \text{ keV}$  y crece rápidamente para energías más altas.

- **Fluorescencia del rayo-X.** El rayo-X incidente es absorbido completamente por el átomo, el cual re-emite un rayo-X de una energía característica de ese elemento. La cantidad de estos rayos-X es usada para medir la cantidad de ese elemento en la muestra. La probabilidad de este proceso de interacción se describe por el coeficiente de absorción de masa  $\mu[\text{f}]$ .

Todos estos coeficientes de absorción son funciones de la energía  $E$  del rayo-X incidente y del elemento cuyo número atómico es  $Z$ .

El conocimiento anterior y las ecuaciones implicadas son muy importantes, ya que las concentraciones pueden ser calculadas muy precisamente, basado en los datos de intensidad del analizador en línea.

$\mu[\text{scC}]$  Este coeficiente de absorción de masa Compton cambia más bien lentamente con  $Z$  y la energía del rayo-X incidente. En varios casos este es el coeficiente más pequeño. Para números atómicos bajos este es el coeficiente más significativo.

Ahora, por conveniencia se define el coeficiente de absorción de masa total como

$$\mu[\text{tot}] = \mu[\text{scC}] + \mu[\text{scR}] + \mu[\text{f}] \quad \text{Ecuación 3.}$$

$\mu[\text{scR}]$  Este coeficiente de absorción de masa Rayleigh es aproximadamente proporcional a  $Z^{1.3}$  y  $E^{-1.3}$ . Para la mayoría de los sólidos y energías, es mayor que  $\mu[\text{scC}]$  y en todos los casos más pequeño que  $\mu[\text{f}]$ .

$\mu[\text{f}]$  Este coeficiente de absorción de masa de fluorescencia es aproximadamente proporcional a  $Z^4$  y  $E^{-3}$  pero también hay saltos de orden de magnitud de su valor en ciertas energías de absorción características para cada elemento.  $\mu[\text{f}]$  es en nuestro caso el más grande de los coeficientes de absorción.

### 2.2.11. Atenuación de rayos-X

Cuando los rayos-X golpean una muestra, los rayos-X son removidos de los rayos originales por el proceso de interacción y los rayos son atenuados de su intensidad original  $N_0$ .

#### Muestra homogénea

La intensidad remanente  $N$  para una muestra homogénea se puede mostrar como:

$$N = N_0 * e^{-\rho t \sum c_i \mu_i[\text{tot}]} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde  $\rho$  es la densidad de la muestra y  $t$  es la profundidad a la cual el rayo ha penetrado,  $c_i$  es la fracción en peso del elemento  $i$  de la muestra; el elemento  $i$  tiene el coeficiente de absorción total  $\mu_i[\text{tot}]$ .

#### Muestra de pulpa

Ahora se puede calcular la profundidad de penetración  $t$  por los componentes típicos en los cuales las intensidades de varias energías de rayos-X son atenuadas a la mitad de su valor original.

Las diferencias de orden de magnitud entre las energías y los compuestos se observan en la Tabla 6.

Tabla 6. Mitad del grosor para agua, cuarzo y pirita para un rango típico de energías de rayos-X.

Rayos-X	Energía	Agua H <sub>2</sub> O	Cuarzo SiO <sub>2</sub>	Pirita FeS <sub>2</sub>
	keV	t/μm	t/μm	t/μm
K Ka	3.31	46	6	
Ni Ka	7.47	532	59	
Pt La	9.4	1070	116	9
Mo Ka	17.43	6030	706	52

Cuando comparamos la atenuación de los rayos-X típicos con el tamaño de partícula de 100 μm de los minerales, se concluye que la muestra de pulpa típica no es homogénea desde el punto de vista de los rayos X. Varias energías de rayos-X solamente pueden penetrar la superficie de partículas o su intensidad es atenuada a solamente una fracción de su valor original, cuando pasan a través de una partícula.

La no homogeneidad decrece la atenuación promedio muy considerablemente haciendo la Ecuación 4 inadecuada para predecir un valor numérico para la atenuación de rayos-X en una pulpa típica. El tamaño de partícula influye mucho en la atenuación.

### 2.2.12. Emisión de rayos-X

La radiación incidente es atenuada cuando penetra más al fondo de la muestra. Cada interacción sin embargo produce rayos-X, las intensidades que son medidas por el analizador.

### 2.2.13. Muestra homogénea

Cuando la radiación incidente golpea una capa delgada de muestra que contiene los átomos del elemento i, esta capa emitirá una intensidad de rayos-X proporcional a la siguiente expresión:

$$\Delta N[x] \approx \rho * \Delta t * \sum_i c_i \mu_i[x] \quad \text{Ecuación 5}$$

Para una muestra gruesa plana se tienen también que tomar en cuenta las radiaciones incidentes y las emitidas. La teoría predice que las intensidades medidas son proporcionales a las siguientes expresiones:

$$N[scC] \approx (\sum_i c_i \mu_i[scC]) / (\sum_i c_i \mu_i[tot]) \quad \text{Ecuación 6}$$

$$N[scR] \approx (\sum_i c_i \mu_i[scR]) / (\sum_i c_i \mu_i[tot]) \quad \text{Ecuación 7}$$

$$N[A] \approx (C_A \mu_A [f]) / (\sum_i c_i \mu_i[tot])_{inc} + b(\sum_i c_i \mu_i[tot])_{em} \quad \text{Ecuación 8}$$

En las ecuaciones 6,7 y 8 el símbolo para Compton, Rayleigh o fluorescencia está representado por: scC, scR o f, respectivamente.

#### 2.2.14. Intensidad Fluorescente

Para una partícula de mineral individual las ecuaciones 6 a 8 se aplican si la partícula es suficientemente grande para ser gruesa. Entonces se puede calcular, que el hierro en la Calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), Pirita ( $\text{FeS}_2$ ) y Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) o partículas de Magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) darán una intensidad de hierro fluorescente  $N[\text{Fe}]$  por % de hierro que es más pequeña en la calcopirita y más grande para los óxidos.

Esto es llamado el efecto de mineralización. Eso significa que el mismo contenido de hierro dará una intensidad diferente dependiendo en qué mineral se encuentra contenido el hierro. Consideraciones similares se aplican al Cobre (Cu) en la Calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y la Calcosita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ).

#### 2.2.15. Intensidad Compton

Se puede calcular de la Ecuación 6 que la intensidad de dispersión Compton es más grande para una muestra de agua pura que para la mayoría de los sólidos.  $\mu[\text{scC}]$  es solamente 50% más grande para el agua que para los sólidos comunes pero el coeficiente de absorción total en el denominador de la Ecuación 6 es solamente una fracción para el agua que lo que es para los sólidos comunes.

El carbón es la excepción que confirma la regla. El carbón da casi el doble de la intensidad de dispersión Compton que la del agua.

#### 2.2.16. Intensidad Rayleigh

La dispersión Rayleigh de acuerdo con la Ecuación 7 tiene la misma dependencia de  $\mu[\text{tot}]$  como la intensidad Compton. Así, el agua da también una intensidad de dispersión Rayleigh más alta que la mayoría de los sólidos.

El numerador, el coeficiente de absorción de masa de los rayos-X producidos  $\mu[\text{scR}]$  en la Ecuación 7, es aproximadamente proporcional a  $Z^{1.3}$  y  $E^{-1.3}$ .  $\mu[\text{scR}]$  cambia así en una dirección similar como  $\mu[\text{tot}]$  con E y Z, y la intensidad Rayleigh es menos sensible a los cambios en material de muestra y energía de dispersión que la dispersión Compton.

#### 2.2.17. Comparando las intensidades

El numerador, el coeficiente de absorción de masa de rayos-X en las Ecuaciones 6 y 7 es más grande para la dispersión Rayleigh que para la dispersión Compton, para todos los elementos con un Z alto. El punto de cruce es 10keV para  $Z=5$  boro y 20keV para  $Z=10$  neón.

Se encontró que la intensidad Rayleigh era menos sensible a cambios en material de muestra y energías de dispersión que la dispersión Compton. Si se calcula valores para agua,  $\text{H}_2\text{O}$  y otros materiales X se consigue:

$$\{N[\text{scR}][\text{H}_2\text{O}]/N[\text{scR}][\text{X}]\}^2 \cdot \{N[\text{scC}][\text{H}_2\text{O}]/N[\text{scC}][\text{X}]\} \quad \text{Ecuación 9}$$

Lo cual significa que la relación de dispersión Rayleigh para dos materiales homogéneos tiene que ser elevada al cuadrado para igualar la misma relación para la dispersión Compton.

Esto también significa en la práctica, la dispersión Compton es una medida más sensible de un cambio en contenido de sólidos que la dispersión Rayleigh, al menos para lodos con un tamaño de partícula muy pequeño.

Cada expresión es la relación del coeficiente de absorción de masa que produce rayos-X al coeficiente de absorción de masa total.

Para la intensidad fluorescente  $N[A]$  del elemento A, el coeficiente de absorción de masa ha sido calculado como la suma de dos términos, uno de la radiación incidente y otro de la radiación emitida. Las energías de estas radiaciones y por consiguiente los coeficientes de absorción son diferentes. La constante  $b$  se usa para corregir la diferencia de dirección de la radiación incidente y emitida, cuando tienen un ángulo diferente a la superficie plana de la muestra.

En lo subsecuente, se asume que  $b$  frecuentemente es 1.

Para la dispersión Compton se descarta la pequeña diferencia en energía de la radiación incidente y emitida.

### **2.2.18. Muestra de pulpa desde el punto de vista de emisión no homogénea**

La muestra de pulpa típica es desde el punto de vista de emisión no homogénea, es análoga a la subsección previa. Así, las Ecuaciones 5 a 7 no se aplican a una muestra de pulpa típica. No existe una teoría satisfactoria y simple para muestras de la pulpa no es homogéneas.

Algunas cosas son entendidas cualitativamente y sostenidas por la experiencia práctica en la calibración. La intensidad de dispersión Compton corrige el porcentaje de sólidos mejor que la dispersión Rayleigh como se deduce de la sección previa. El uso de la dispersión de la línea del tubo de Molibdeno (Mo) es preferible siempre que sea posible, porque la penetración más alta de la línea de Molibdeno (Mo), hace la dispersión menos sensible al tamaño de partícula y los efectos de la mineralización.

El carbón puede causar problemas debido a que un incremento en carbón aumentará la dispersión.

El uso de la dispersión Rayleigh y Compton da mejoras en ciertos casos.

Si una muestra se vuelve más gruesa, la pulpa parecerá más acuosa al analizador. Una gran parte de los sólidos no son detectados porque solamente son vistas las superficies de las partículas. Las intensidades de línea del elemento decrecen, pero la dispersión Compton incrementará. Así, la dispersión Compton también ayudará a compensar por el efecto del tamaño de partícula, al mismo tiempo que se compensan los efectos de porcentajes de sólidos.

### **2.2.19. Detección de rayos-X**

En fluorescencia de rayos-X de energía dispersiva (EDXRF) los analizadores normalmente usan detectores de estado sólido. En estos detectores un voltaje alto junta las cargas

eléctricas causadas por la ionización de un rayo-X, pero no se hace amplificación de la carga en este detector. Por consiguiente, el valor del voltaje alto no es muy crítico.

Un contador proporcional es usado normalmente como el detector después de los espectrómetros de cristal como en el Courier®, también como un detector de energía dispersiva para los elementos de número atómico bajo  $K - V$ . En este detector la carga inicial es multiplicada por un campo eléctrico fuerte causando ionización adicional. La amplificación en el detector es muy sensible a los cambios en el campo eléctrico o a los altos voltajes que éstos causan. De esta manera, el tamaño de los pulsos eléctricos causados por cada rayo X es determinado primariamente afinando el voltaje alto.

### 2.2.20. Velocidad de Conteo

En los analizadores por fluorescencia de rayos X de energía dispersiva (ED FRX) todas las radiaciones emitidas son medidas típicamente por un detector enfriado de estado sólido.

Los sistemas fluorescencia de rayos X con un detector de energía dispersiva (ED FRX), tienen que contar el espectro total, todas las líneas de elementos, líneas de fuentes de excitación dispersadas, etc.

Un detector puede medir a lo más 20,000 conteos por segundo. En el Courier se puede usar un detector PIN en casos especiales. Su velocidad de conteo máximo es 10,000 conteos por segundo.

El Courier tiene normalmente un detector de energía dispersiva (ED), que es un contador proporcional. La efectividad del detector es fuertemente dependiente del gas que llena el detector, la energía de los rayos incidentes y el tamaño del orificio en el limitador enfrente del detector. Parte extrema de la alta energía del espectro es detectada con una eficiencia muy baja debido a que la absorción del gas detector no es suficiente. Añadiendo un filtro enfrente del detector que absorbe los rayos-X de baja energía, se baja la eficiencia de detección. (Figura 12)

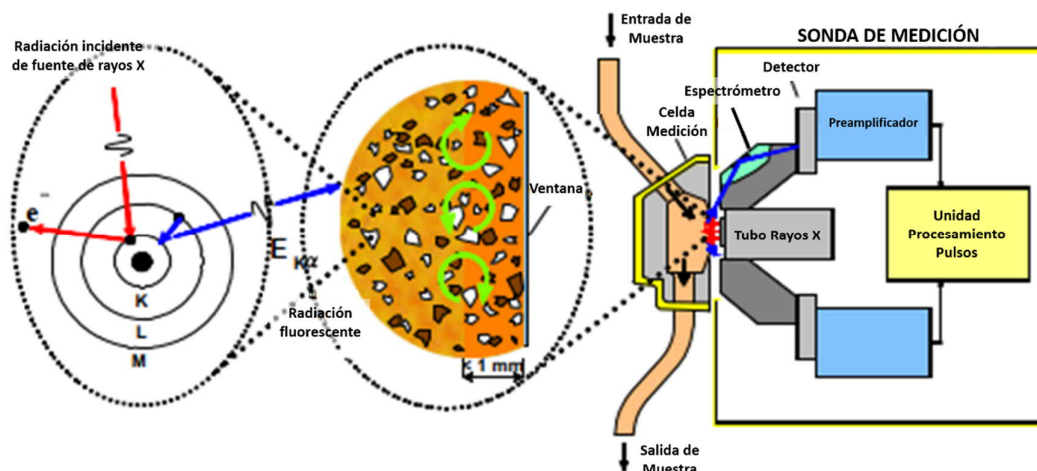


Figura 12. Análisis FRX en la sonda del analizador (Courier)

Finalmente, el poder del tubo de rayos-X es tan grande que siempre se debe de usar un limitador para reducir la velocidad de conteo total detectada a aproximadamente 10,000

conteos/segundo o menos. Los analizadores de elementos en línea Courier, pueden usar un contador proporcional para elementos ligeros K – V de la misma manera.

Esto significa que la eficiencia del detector puede ser afinada para alcanzar su punto máximo en una energía donde se requiere eficiencia alta para una concentración pequeña y mientras la eficiencia para otros elementos y dispersores es baja. Un detector de estado sólido tiene una sensibilidad uniforme y se llena con conteos de la parte de energía alta del espectro. Para los elementos de concentración baja crítica se puede obtener un orden de magnitud más alta de velocidad de conteo con el contador proporcional que con los detectores de estado sólido.

En los analizadores de elementos en línea Courier, los cuales son analizadores cuentan con un detector de longitud de onda (WDFRX), cada uno de los seis espectrómetros de cristal fijos, limitan el espectro de rayos-X solamente la línea de rayos-X requerida, es decir, cada línea del elemento se mide por su propio detector. El detector puede ser operado a temperatura ambiente. La intensidad de la línea puede ser hasta de 30,000 conteos/segundo o más.

### 2.2.21. Resolución

Aunque todas las líneas de elementos tienen una energía única, no todas las líneas se pueden resolver de las otras por el detector en uso.

### 2.2.22. Detector de estado sólido

El detector de estado sólido enfriado con nitrógeno líquido tiene una buena resolución de energía constante de 200 eV en velocidades de conteo prácticos en un ambiente industrial (Figura 13). La especificación de fábrica para velocidades de conteo bajos en el laboratorio es ligeramente mejor. Esta resolución es suficiente en la mayoría de los casos para resolver completamente las líneas del elemento principal, pero frecuentemente las líneas secundarias se superponen con la línea principal de algún otro elemento.

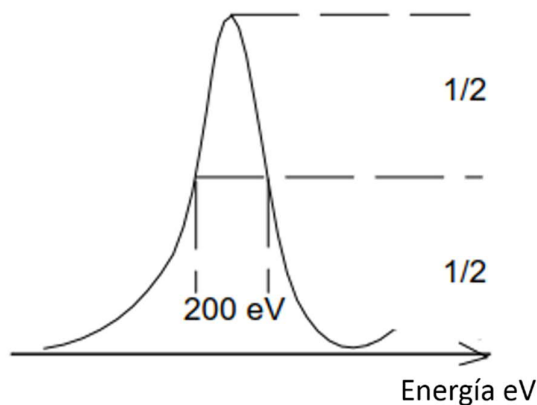


Figura 13. Resolución de detector enfriado de nitrógeno líquido típico





5	B	183							
6	C	277							
7	N	392							
8	O	525							
9	F	677							
10	Ne	849	849						
11	Na	1041	1041	1071					
12	Mg	1254	1254	1302					
13	Al	1487	1486	1557					
14	Si	1740	1739	1836					
15	P	2014	2013	2139					
16	S	2308	2307	2464					
17	Cl	2622	2621	2816					
18	Ar	2958	2956	3191					
19	K	3314	3311	3590					
20	Ca	3692	3688	4013	341	341	345		
21	Sc	4091	4086	4461	395	395	400		
22	Ti	4511	4505	4932	452	452	458		
23	V	4952	4945	5427	511	511	519		
24	Cr	5415	5406	5947	573	573	583		
25	Mn	5899	5888	6490	637	637	649		
26	<b>Fe</b>	<b>6404</b>	<b>6391</b>	<b>7058</b>	705	705	719		
27	Co	6930	6915	7649	776	776	791		
28	Ni	7478	7461	8265	852	852	869		
29	<b>Cu</b>	<b>8048</b>	<b>8028</b>	<b>8905</b>	930	930	950		
30	<b>Zn</b>	<b>8639</b>	<b>8616</b>	<b>9572</b>	1012	1012	1035		
31	Ga	9252	9225	10264	1098	1098	1125		
32	Ge	9886	9855	10982	1188	1188	1219		
33	<b>As</b>	<b>10544</b>	<b>10508</b>	<b>11726</b>	1282	1282	1317		
34	Se	11222	11181	12496	1379	1379	1419		
35	Br	11924	11878	13291	1480	1480	1526		
36	Kr	12649	12598	14112	1586	1586	1637		
37	Rb	13395	13336	14961	1694	1693	1752		
38	Sr	14165	14098	15836	1807	1805	1872		
39	Y	14958	14883	16738	1923	1920	1996		
40	Zr	15775	15691	17668	2042	2040	2124	2219	2303
41	Nb	16615	16521	18623	2166	2163	2257	2367	2462
42	Mo	17479	17374	19608	2293	2290	2395	2518	2624
43	Tc	18367	18251	20619	2424	2420	2538	2674	2792
44	Ru	19279	19150	21657	2559	2554	2683	2836	2965
45	Rh	20216	20074	22724	2697	2692	2834	3001	3144
46	Pd	21177	21020	23819	2839	2833	2990	3172	3329
47	<b>Ag</b>	<b>22163</b>	<b>21990</b>	<b>24942</b>	2984	2978	3151	3348	3520
48	Cd	23174	22984	26096	3134	3127	3317	3528	3717
49	In	24210	24002	27276	3287	3279	3487	3714	3921

50	Sn	25271	25044	28486	3444	3435	3663	3905	4131	
51	Sb	26359	26111	29726	3605	3595	3844	4101	4348	
52	Te	27472	27202	30996	3769	3759	4030	4302	4571	
53	I	28612	28317	32295	3938	3926	4221	4508	4801	
54	Xe	29779	29458	33624	4110	—	—	—	—	
55	Cs	30973	30625	34987	4287	4272	4620	4936	5280	
56	Ba	32194	31817	36378	4466	4451	4828	5157	5531	
57	La	33442	33034	37801	4651	4634	5042	5384	5789	833
58	Ce	34720	34279	39257	4840	4823	5262	5613	6052	883
59	Pr	36026	35550	40748	5034	5014	5489	5850	6322	929
60	Nd	37361	36847	42271	5230	5208	5722	6089	6602	978
61	Pm	38725	38171	43826	5433	5408	5961	6339	6892	—
62	Sm	40118	39522	45413	5636	5609	6205	6586	7178	1081
63	Eu	41542	40902	47038	5846	5817	6456	6843	7480	1131
64	Gd	42996	42309	48697	6057	6025	6713	7103	7786	1185
65	Tb	44482	43744	50382	6273	6238	6978	7367	8102	1240
66	Dy	45998	45208	52119	6495	6458	7248	7636	8419	1293
67	Ho	47547	46700	53877	6720	6680	7525	7911	8747	1348
68	Er	49128	48221	55681	6949	6905	7811	8189	9089	1406
69	Tm	50742	49773	57517	7180	7133	8101	8468	9426	1462
70	Yb	52389	51354	59370	7416	7367	8402	8759	9780	1521
71	Lu	54070	52965	61283	7656	7605	8709	9049	10143	1581
72	Hf	55790	54611	63234	7899	7845	9023	9347	10516	1645
73	Ta	57532	56277	65223	8146	8088	9343	9652	10895	1710
74	W	59318	57982	67244	8398	8335	9672	9962	11286	1775
75	Re	61140	59718	69310	8653	8586	10010	10275	11685	1843
76	Os	63001	61487	71413	8912	8841	10355	10599	12095	1910
77	Ir	64896	63287	73561	9175	9100	10708	10920	12513	1980
78	Pt	66832	65112	75748	9442	9362	11071	11251	12942	2051
79	<b>Au</b>	68804	66990	77984	<b>9713</b>	<b>9628</b>	<b>11442</b>	<b>11585</b>	<b>13382</b>	2123
80	Hg	70819	68895	80253	9989	9898	11823	11924	13830	2195
81	Tl	72872	70832	82576	10269	10173	12213	12272	14292	2271
82	<b>Pb</b>	74969	72804	84936	<b>10552</b>	<b>10450</b>	<b>12614</b>	<b>12623</b>	<b>14764</b>	2346
83	Bi	77108	74815	87343	10839	10731	13024	12980	15248	2423
84	Po	79290	76862	89800	11131	11016	13447	13340	15744	—
85	At	81520	78950	92300	11427	11305	13876	—	16251	—
86	Rn	83780	81070	94870	11727	11598	14316	—	16770	—
87	Fr	86100	83230	97470	12031	11895	14770	14450	17303	—
88	Ra	88470	85430	100130	12340	12196	15236	14841	17849	—
89	Ac	90884	87670	102850	12652	12501	15713	—	18408	—
90	Th	93350	89953	105609	12969	12810	16202	15624	18983	2996
91	Pa	95868	92287	108427	13291	13122	16702	16024	19568	3082

92	U	98439	94665	111300	13615	13439	17220	16428	20167	3170
----	---	-------	-------	--------	-------	-------	-------	-------	-------	------

### 2.2.23. Espectrómetro de cristal.

El Courier puede fácilmente resolver la línea de cobalto (Co)  $K_{\alpha}$  de la línea Hierro (Fe)  $K_{\beta}$  con los espectrómetros de cristal. El Courier puede así medir el cobalto usando su línea más intensa, bajando a concentraciones muy pequeñas.

El espectrómetro de cristal tiene una resolución de longitud de onda bastante constante de aproximadamente 0.004-0.006 Angstrom. En términos de energía, esto es alrededor de 20-30 eV en la región de cobre y 100 eV alrededor del molibdeno. Los analizadores WDXRF tienen así una resolución mejor que las que tienen los analizadores EDXRF. Ellos tienen raras veces superposición de picos y tienen solamente una proporción muy pequeña de cualquier radiación de fondo incluida en la línea del elemento.

### 2.2.24. Contador Proporcional

El canal de energía dispersiva (ED) del contador proporcional del Courier tiene una resolución de energía de aproximadamente 15-20% dependiendo del detector y la energía de la línea. La resolución ha sido mejorada restringiendo la velocidad de conteo más que para los canales del espectrómetro de cristal Courier. También el tiempo muerto del canal detector es más alto 16  $\mu$ s. Aún la resolución restringe las posibilidades de medir las líneas de elementos vecinos.

Si la distancia entre las líneas es más grande la superposición es menos severa y se permiten las relaciones de concentraciones más grandes.

La siguiente tabla ha sido compilada basada en la experiencia y da alguna indicación de las posibilidades para medir una línea vecina de una concentración bien arriba de los límites de detección normal con un canal-ED con contador proporcional. La tabla 9 es para elementos medidos por líneas K.

Tabla 9. Posibilidades para medir elementos vecinos con líneas K usando un canal-ED con un contador proporcional

Relación de concentración	Distancia entre elementos en números atómicos			
	1	2	3	4
	Exactitud para concentraciones pequeñas			
1	Buena	Excelente	Excelente	Excelente
10	Mala	Buena	Excelente	Excelente
100	Ninguna	Mala	Buena	Excelente

En caso de que la resolución o sensibilidad no sea suficiente se usa un espectrómetro de cristal para la concentración más pequeña.

### 2.3. Determinaciones estadísticas usando el software de Outocal

El software de Outocal Versión 2.5.3 está diseñado especialmente para elaborar modelos multivariados para ser usados en el analizador de elementos en línea Courier, la información estadística proporcionada está conformado por:

- Diagrama de Dispersión

Un diagrama de dispersión trata de explicar los valores de x por una o más variables en y usando una línea recta

- Coeficientes de una regresión lineal Multivariable ( $R_0, R_1 \dots R_n$ )

Al calcular una ecuación de regresión para modelar datos, Outocal estima los coeficientes para cada variable predictora en función de su muestra y muestra estas estimaciones en una tabla de coeficientes.

- Modelo de calibración Multivariable

La ecuación general 10 para la regresión multivariable es la siguiente:

$$C(\%) = R_0 + R_1 \times I_1 + R_2 \times I_2 + \dots + R_n \times I_n \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde C es la concentración predicha, Rs son constantes de regresión empíricas e Is son las intensidades medidas o los términos no lineales de las intensidades.

- T-valor

Muestra si el coeficiente de regresión de una variable es significativo para una combinación de variables dada. Usada como una base para comparar los coeficientes de la ecuación de calibración unos con otros con respecto a su significancia.

- Error Absoluto ( $\sigma_{\text{abs}}$ )

Este es el error absoluto residual (de las muestras de calibración) como una desviación estándar. También es llamado error estándar. Su cálculo está basado en la diferencia entre el ensayo de laboratorio y el valor dado por la ecuación de calibración. En promedio 68% de las observaciones están dentro de  $\pm 1\sigma$ , 95 % dentro de  $\pm 2\sigma$  y 99.7 % dentro de  $\pm 3\sigma$ . Este es también un estimado del verdadero error del analizador  $\sigma_{\text{verdadero}}$ .

- Error Relativo ( $\sigma_{\text{rel}}$ )

Este es el error residual como una desviación estándar en porcentaje relativo al promedio de las concentraciones de las muestras de calibración.

$$\sigma_{rel} = 100\% \cdot \sigma_{abs} / \text{Cave}$$

Ecuación 11

Cave El promedio de los análisis de laboratorio en un conjunto de datos.

Los valores típicos en el caso de pulpas son:

Componentes concentrado principal 2 - 5 %

Componentes alimentación principal son del 3 - 8 %

Rocas residuales y constituyentes secundarios son del 6 - 12 %

Estos errores son debidos a variaciones en tamaño de grano y mineralización.

En el caso de soluciones, la exactitud es mayor, típicamente cerca de 1-3%, debido a que la muestra es homogénea.

- Coeficiente de correlación (r)

Presenta la interdependencia de dos variables. Usada para observar que tan bien dos valores de concentraciones diferentes se comportan una de otra.

- F-Valor

Este describe la confiabilidad y la estabilidad de la ecuación de calibración. Un valor de F alto significa que la ecuación de calibración dará buenos ensayos también para futuras mediciones y no solo para mediciones de calibración

- Influencia de cada observación ( $\epsilon$ )

El índice de influencia es calculado por Outocal usando la estadística de Cook. Este dice la magnitud de influencia que cada observación tiene sobre la ecuación de regresión.

Un factor del índice de influencia es el residuo estándar de tal manera que para la mayoría de las observaciones de regresiones de buen comportamiento  $\sigma_i \approx \epsilon/\sigma$ . Para algunas observaciones el índice de influencia es arriba de 3, aun cuando el residuo estándar sea pequeño. Esto significa que la observación ha sido seleccionada para tener una influencia grande en la ecuación de regresión. Cuando el número de observaciones es pequeño, varias de las observaciones frecuentemente tendrán números de alta influencia.

Si una observación con un número de influencia excepcionalmente alta es anulada, entonces alguna variable en la ecuación no será necesaria para las otras observaciones. Así, se necesita que esta observación tenga una atención especial.

## 2.4. Equipos de separación

Los clasificadores se caracterizan por dos aspectos que se sobreponen: el método de descarga del producto arenoso y el punto de referencia para el movimiento relativo agua/partícula. Se han diseñado y construido muchos tipos de clasificadores y pueden agruparse en dos, dependiendo la dirección de la corriente del fluido:

a) Clasificadores de corriente vertical: Son aquellos en los que se da un asentamiento retardado. Se caracterizan porque la separación de las partículas de acuerdo con sus tamaños se realiza en una corriente vertical de agua, la cual arrastra a las partículas pequeñas y deja sedimentar a las grandes. Existen varios sistemas tales como:

- Clasificador de columnas (Elutriador)
- Clasificador Fahrenwald
- Clasificador Spitzkasten
- Clasificador ondulado Rheax
- Hidrociclón

b) Clasificadores de corriente horizontal: Son aquellos en los que la clasificación se da por asentamiento libre. Se caracterizan porque la separación de las partículas se realiza en una corriente de agua horizontal, la cual arrastra a las partículas finas y deja sedimentar a las grandes. Además, cuenta en un dispositivo mecánico para remover partículas de gran tamaño. Algunos ejemplos de estos clasificadores son:

- Cono de asentamiento
- Clasificador de rastrillos
- Clasificador de espiral tipo Akins

De acuerdo a lo anterior y a lo que se dispone en la planta metalúrgica, en este trabajo se estudian comparativamente las variaciones en el tamaño y forma de partícula obtenidas en dos periodos de clasificación, que consisten en Cribas de alta frecuencia e Hidrociclones, en donde estas variaciones pueden tener influencia en posibles alteraciones en la composición química elemental en diferentes líneas, con respecto a las lecturas de las composiciones obtenidas por el laboratorio de análisis químico.

### 2.4.1. Hidrociclones

A continuación, se describen algunos de los usos, importancia, diseño y desarrollo del hidrociclón que revolucionó la industria minera en la separación de sólidos.

El primer sistema hidrociclónico fue patentado en el año de 1891 por Bretnet<sup>x</sup>, poco más de un siglo, su aplicación principal fue de tipo industrial, hasta los años 40. Los hidrociclones originalmente fueron diseñados para promover la separación sólido-líquido, pero actualmente suele usarse para sólido-sólido, líquido-líquido y separación gas-líquido. Se han planteado nuevas aplicaciones para la separación de microorganismos en fermentaciones y biodegradación.

Los hidrociclones son básicamente un cilindro vertical fijo, con una entrada tangencial en el borde superior para la alimentación Figura 14, este tipo de sistemas son operados con suspensiones de sólidos y algunas veces con gases o líquidos. Se denomina hidrociclón al sistema que trabaja con suspensiones de sólidos con agua, ésta es inyectada a una velocidad y presión relativamente alta, utilizando la fuerza centrífuga para acelerar la sedimentación de las partículas.

La alimentación entra a alta velocidad, describiendo una espiral convergente hacia el centro hasta encontrar la salida, la trayectoria circular crea un campo de aceleración centrífuga donde las partículas sólidas son más densas que el líquido Figura 14, que se desplazarán radialmente hacia fuera hasta chocar con la pared y caer hacia la salida de fondo (descarga inferior). Figura 15 (Lynch, et. al., 1975<sup>xi</sup>).

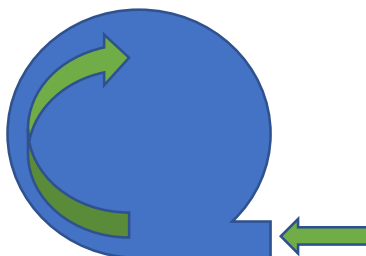


Figura 14. Entrada Recta de un Hidrociclón



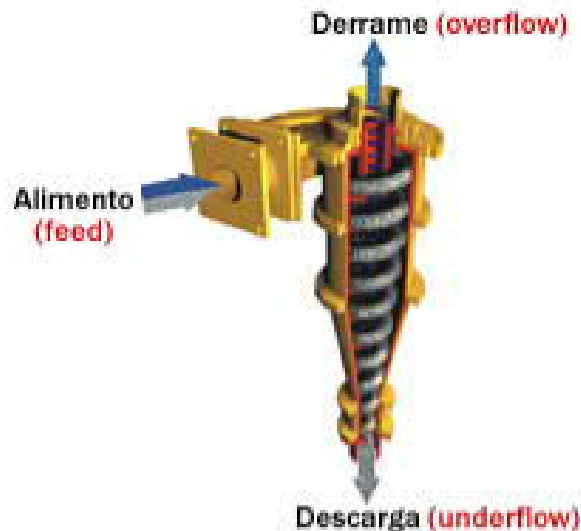


Figura 15. Hidrociclón (Lynch, 1975)

Los hidrociclones, conocidos comúnmente como ciclones, son equipos usados principalmente para la clasificación de sólidos por diferencia de tamaño en pulpas minerales. Un ciclón estándar es aquel que sus dimensiones, como diámetro de ciclón, área de entrada, buscador de vórtice, etc., guardan ciertas relaciones geométricas entre sí.

El principal parámetro de un ciclón es el diámetro, el cual está dado por la dimensión que tiene la cámara de alimentación (Figura 16). El siguiente parámetro es el área de la boquilla de entrada, ésta, normalmente es un orificio rectangular, con el lado mayor paralelo al eje vertical del ciclón. El área de la boquilla es aproximadamente 0.05 veces el diámetro del Hidrociclón al cuadrado.

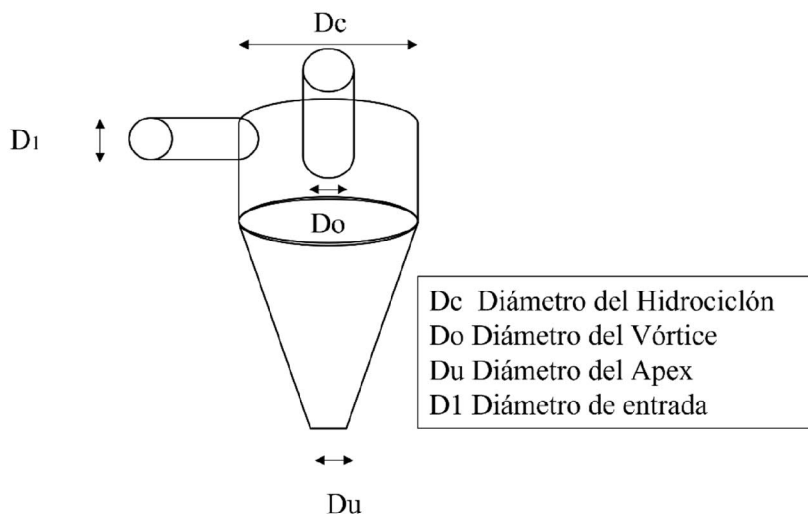


Figura 16. Dimensiones de un hidrociclón típico

El buscador de vórtice tiene por función principal controlar la separación y el flujo que deja el ciclón por el derrame. A fin de evitar el corto circuito, éste debe extenderse por debajo de la cámara de alimentación. El tamaño del buscador de vórtice es igual a 0.35 veces el diámetro de ciclón, sin embargo, de modificarse tener en cuenta que:

- a) Una mayor longitud asegurará menor probabilidad de corto circuito, pero el derrame será más fino.
- b) Contrariamente, si su longitud se disminuye la probabilidad de corto circuito (carga que no se clasifica) se incrementará y el derrame será más grueso.

La sección cilíndrica es el siguiente parámetro importante de un hidrociclón. Esta sección se localiza entre la cámara de alimentación y la sección cónica. Su diámetro es igual al del hidrociclón y su función es proveer del tiempo de retención suficiente para la clasificación. En el hidrociclón estándar la longitud de dicha sección es igual a su diámetro.

La sección cilíndrica, la cual suele tener un ángulo de  $20^\circ$  en ciclones  $\geq 20"$  y de  $12^\circ$  en ciclones  $< 20"$ , tiene por función extender el tiempo de retención, así como corregir la trayectoria de algunas de las partículas que por la ineficiencia propia del equipo se reportarían a las salidas opuestas según su tamaño.

La terminación de la sección cónica es el ápice. El diámetro de este orificio está en función de la aplicación, pero debe ser lo bastante grande para permitir que los sólidos que han sido clasificados hacia la descarga salgan libremente. El orificio estándar tiene un diámetro de 0.10 veces el diámetro del ciclón, pero puede ser tan grande como 0.35 veces.

Una vez que la pulpa entra al ciclón, cada una de las partículas desarrolla tres velocidades; que a su vez generan cuatro fuerzas, las que dependiendo de su magnitud y tamaño de las partículas harán que algunas de éstas se reporten en el derrame y otras a la descarga.

Una vez descritas las diferentes velocidades que se generan en un hidrociclón, consideremos una partícula en un plano y sobre ésta en el hidrociclón donde actúan tres fuerzas (sin tomar en cuenta la velocidad o fuerza vertical), Figuras 17 a 20:

Las distintas velocidades que se desarrollan sobre cada partícula son:

- a). Velocidad radial
- b). Velocidad tangencial
- c). Velocidad vertical.

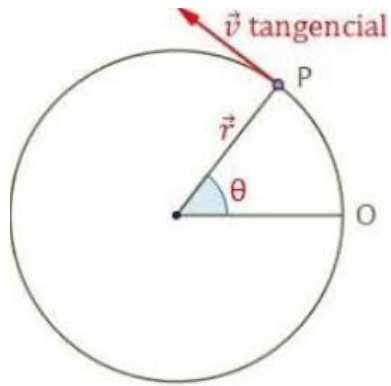


Figura 17. Velocidad tangencial

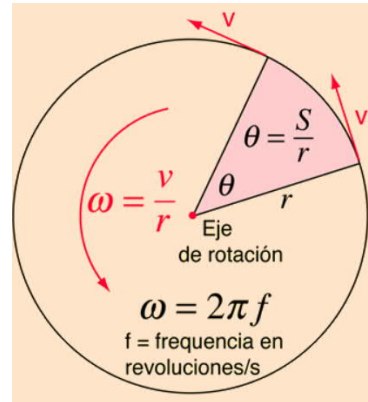
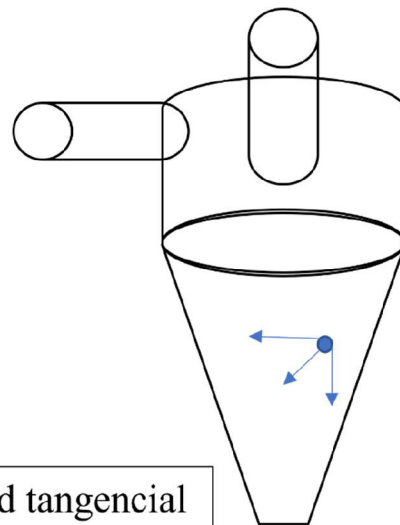
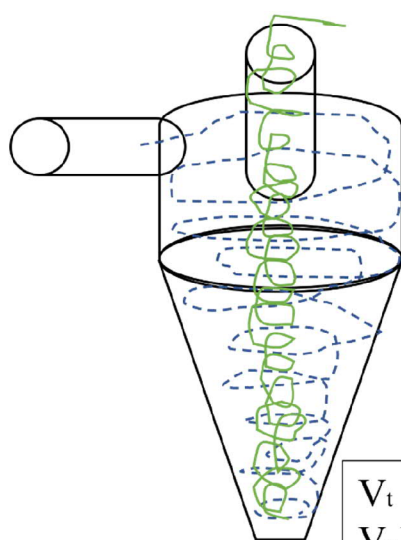


Figura 18. Velocidad radial



$V_t$  Velocidad tangencial  
 $V_r$  Velocidad Radial  
 $V_v$  Velocidad vertical

Figura 19. Trayectoria de las partículas en el Hidrociclón

Figura 20. Velocidades en el Hidrociclón

Las velocidades referenciadas a un hidrociclón corresponden a:

- 1).- Una fuerza hacia el interior resultante de la velocidad radial que tiene la partícula (FR).
- 2).- Una fuerza centrífuga hacia al exterior, resultante de la aceleración causada por la velocidad tangencial (FC).
- 3).- Una fuerza de rozamiento hacia el interior, resultante de la resistencia que opone el fluido a la aceleración centrífuga de la partícula (FD).

La resultante entre estas fuerzas determinará el camino que seguirá cada partícula, así tenemos que:

Si  $FR + FD > FC$  la partícula se moverá hacia el interior y tenderá a reportarse en el derrame.

Si  $FR + FD < FC$  la partícula se moverá hacia afuera y tenderá a ir a la descarga.

Aquellas partículas cuya resultante sea tal que  $FR + FD = FC$ , tenderán a moverse hacia una distancia  $R$ , la cual se denomina radio de equilibrio. Ahora bien, las partículas cuyo radio de equilibrio coincida con el contorno de velocidad vertical cero, son consideradas que tienen 50% de oportunidad de ir hacia cualquiera de las salidas o direcciones. Este tamaño de partícula, llamado tamaño  $D_{50}$  ó  $d_{50}$ , es el tamaño de separación del ciclón.

La principal consideración que es necesaria tener en cuenta a la hora de seleccionar el tamaño y diseño adecuados del ciclón, es el objetivo de clasificación y no la capacidad, como sucede en muchos otros dispositivos de procesos.

Para cada objetivo de clasificación específica, se calcula la relación adecuada entre el orificio de entrada, el buscador de vórtices y el tamaño del orificio del apex, y todos los ciclones se diseñan para el trabajo antes de su envío.

Pocas veces resulta necesario cambiar los tamaños de estos orificios, excepto en caso de que los objetivos de la clasificación o las condiciones de funcionamiento de la planta se vean alterados.

#### **2.4.1.1. Orificio de entrada**

El tamaño del orificio de entrada determina la velocidad de entrada de la pulpa, pero su función principal es proporcionar un patrón de flujo suave en el punto de entrada.

Este diseño minimiza las turbulencias en este punto y reduce la posibilidad de que partículas de tamaño demasiado grande sufran un cortocircuito en el buscador de vórtices, debido a turbulencias o a rebotes.

El uso de buscadores de vórtices de tamaños mayores para separaciones equivalentes, deben ser adecuados a una entrada tangencial directa; por lo tanto, se obtienen menores caídas de la presión, capacidades de la unidad superiores y separaciones más nítidas.

#### **2.4.1.2. Orificio Vórtices**

Desde el punto de vista de su impacto en los resultados de funcionamiento, este es el orificio más importante de todos. El tamaño del buscador de vórtices tiene un gran efecto en la caída de presión para un volumen dado y, en general, cuanto más grande sea el buscador de vórtices, más grueso será el corte y mayor la proporción de sólidos del sobreflujo. Por el contrario, un buscador de vórtices de menor tamaño normalmente significa que el corte será más fino y que los sólidos estarán en una posición más baja, pero si el tamaño es demasiado pequeño, el volumen y la velocidad podrían reducirse y el rendimiento podría ser inferior.

Para cualquier pasta, deberá buscarse un equilibrio óptimo entre disolución permisible, buscador de vórtices de mayor tamaño y caída de presión más baja permisible para el objetivo deseado. Como la mayoría de los problemas de clasificación implican un volumen fijo, el tamaño del buscador de vórtices y la caída de presión serán interdependientes.

#### **2.4.1.3. Orificio del ápex**

La función del orificio del apex es descargar el material grueso de tal forma que se consiga la máxima densidad y suavidad en la descarga.

Por lo tanto, deberá ser lo suficientemente grande para permitir que el tonelaje del que se informa que hay allí, salga con una forma de sección transversal ligeramente cónica, pero no deberá utilizarse como control de separación.

El orificio del apex nunca debería ser tan pequeño para que se dé una situación de «cableado», ya que esto indica que llega un tonelaje mayor al flujo bajo de lo que el orificio del apex permite descargar en ese momento.

Por lo tanto, el resto debe ir al sobre flujo, reduciendo la eficiencia de la clasificación.

### **2.4.2. CRIBAS DE ALTA FRECUENCIA**

#### **2.4.2.1. Descripción**

Una Cribadora de Vibración Lineal (Stack Sizer)<sup>xiii</sup>, se emplea para la separación de partículas en la industria del procesamiento de minerales e industria en general. Su configuración vertical en cascada, consta de hasta cinco bastidores con mallas, lo cual minimiza el área de instalación y, al mismo tiempo, maximiza la productividad. Para cumplir con los requisitos de procesamiento específicos, es posible especificar el ángulo de bastidor de cribado requerido en función de las necesidades, entre 15° a 25°.

El Stack Sizer utiliza motores vibradores duales para transferir directamente la vibración a los bastidores de la criba. Los bastidores de cada malla son levemente abombados para facilitar el tensado de las mallas y prolongar su vida útil. Los alimentadores de cada bastidor de malla proporcionan una distribución uniforme de la pulpa de alimentación en los

bastidores, y los soportes flotantes aíslan el movimiento vibratorio de los bastidores de las mallas hacia la estructura soporte.

Los componentes principales se describen a continuación a partir de la Figura 21.

#### 2.4.2.2. Componentes Principales

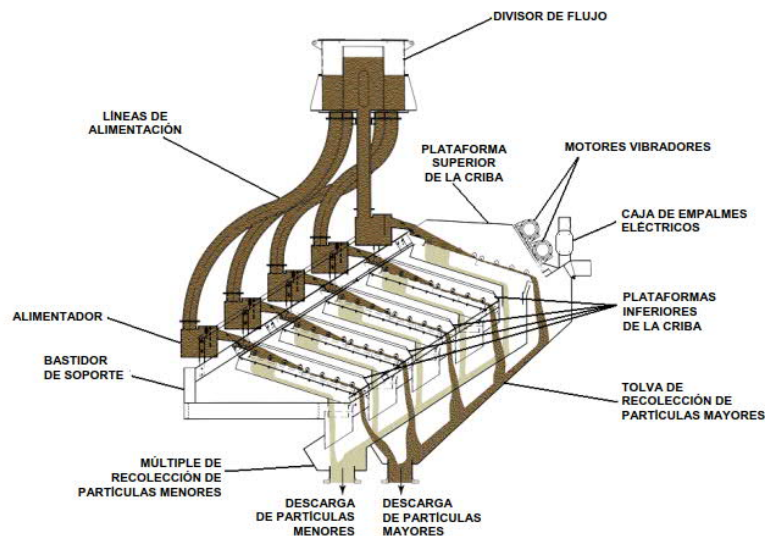


Figura 21. Componentes principales del Stack Sizer (Extracto del Manual de funcionamiento y mantenimiento cribas, Derrick Corporation 2008).

##### a) Divisor de flujo

El divisor de flujo (Figura 22) es un depósito circular de pared doble que recibe la pulpa y lo distribuye de manera uniforme a cada uno de los alimentadores que abastecen los bastidores de la criba. El divisor de flujo viene equipado con salientes para que el usuario monte la unidad en una ubicación conveniente encima de Stack Sizer. Cada una de las cinco salidas de la unidad se conecta con un alimentador a través de una manguera de abastecimiento.

El lado que se introduce por la brida superior central ingresa en el depósito interno, sale a través de las ranuras de la pared de este depósito e ingresa en el depósito externo. Los divisores que se encuentran entre las paredes del depósito interno y externo forman compartimentos que se alinean con las cinco salidas del divisor de flujo. Estos divisores separan, por tanto, la pulpa es distribuida uniformemente entre las salidas, las cuales se descargan en las líneas de alimentación conectadas con los alimentadores.

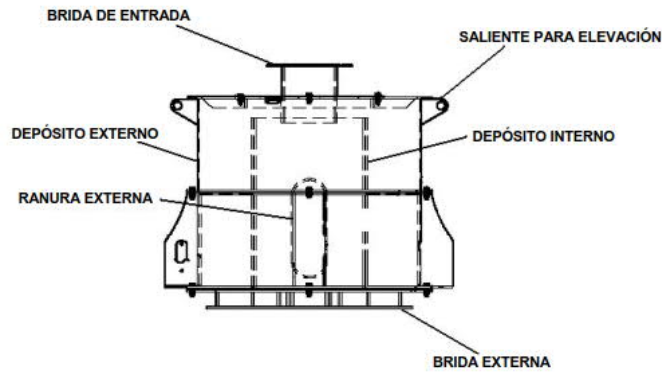


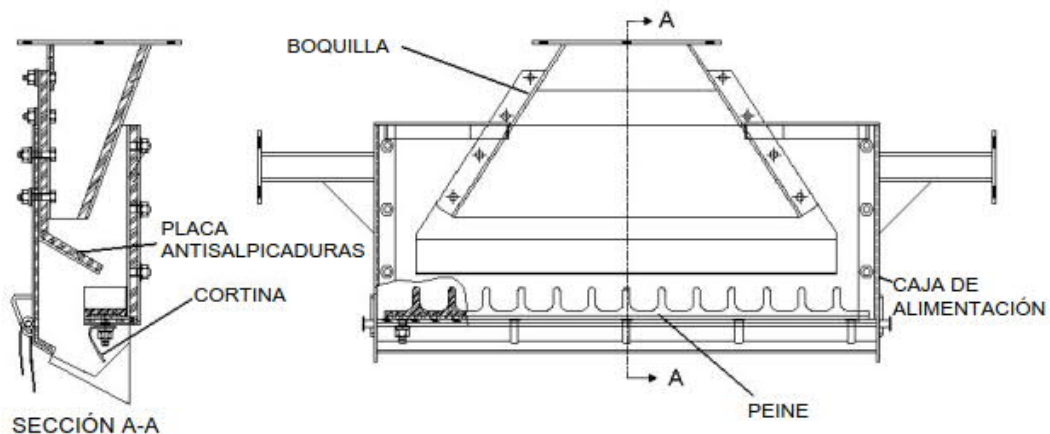
Figura 22. Divisor de Flujo (Stack Sizer)

### b) Alimentadores

Se encuentran disponibles dos tipos de alimentadores por rebosadero y de cribas múltiples (MS) para Stack Sizer. La selección del tipo de alimentador dependerá de la aplicación en que se utilice Stack Sizer. Cada bastidor de la criba es abastecido por un alimentador separado que recibe pulpa del divisor de flujo. En los siguientes párrafos se describen estos alimentadores.

### c) Alimentador MS estándar

Los alimentadores MS estándares (Figura 23) son ideales para aplicaciones de separación de partículas grandes. La pulpa ingresa en el alimentador a través de una boquilla con forma de abanico que aplasta y distribuye el flujo en el espesor del alojamiento del alimentador. La placa anti-salpicaduras reduce la velocidad de la pulpa a medida que descende en dirección al peine, el cual distribuye más la pulpa mientras sale por la abertura de descarga. Las cortinas de goma de la salida del alimentador representan la etapa final de suavizado y distribución homogénea de la pulpa a medida que pasa hacia la plataforma de la criba las superficies interiores de la caja y de la entrada de alimentación vienen completamente revestidas de goma para reducir desgaste.



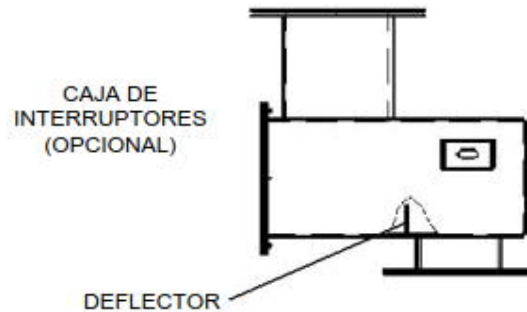


Figura 23. Alimentador MS estándar (Manual criba Derrick).

#### d) Bastidores de la criba

Utiliza un bastidor superior de la criba (Figura 20) y hasta cuatro bastidores inferiores. Los motores vibradores duales se montan en las paredes extendidas del bastidor superior de la criba. Cuatro canales de soporte laterales ubican y aseguran los bastidores superiores de la criba de modo que las fuerzas G producidas por los motores se transmitan a todos los bastidores inferiores de la criba. Los montantes de flotación de goma negra aíslan el bastidor de soporte del movimiento vibratorio de los bastidores de la criba.

El material de proceso que pasa por cada panel de la criba cae en la bandeja de recolección de partículas menores, que realiza la descarga dentro del múltiple de recolección de partículas menores a través del conducto de drenaje. El material de menor tamaño fluye hacia el exterior de la brida de descarga de partículas menores.

El material de proceso de mayor tamaño se dirige hacia el extremo de cada panel de la criba, donde cae y es recibido por la tolva de recolección de partículas mayores. Las partículas mayores fluyen hacia el exterior de la brida de descarga de partículas mayores.

#### e) Motores vibradores

Los motores vibradores duales se instalan directamente en las almohadillas de montaje del bastidor superior de la criba de Stack Sizer (Figura 24). Los motores vibradores son motores de inducción eléctricos que emplean pesos excéntricos para generar la vibración de alta amplitud requerida para separar sólidos y desplazados hasta los paneles de la criba.

#### f) Múltiple de recolección de partículas menores

Las partículas menores y el líquido son recogidos y descargados por el múltiple de partículas menores. El múltiple es un conjunto de dos piezas que no tiene piezas móviles. Todas las superficies interiores se encuentran revestidas de goma para proporcionar alta durabilidad. El múltiple de recolección de partículas menores se instala dentro de la tolva de partículas mayores.

La mitad superior del múltiple contiene conductos de entrada ubicados para recibir los conductos de descarga de las bandejas de recolección de los bastidores de la criba. La mitad inferior del múltiple tiene la brida de descarga de partículas menores en su extremo inferior.



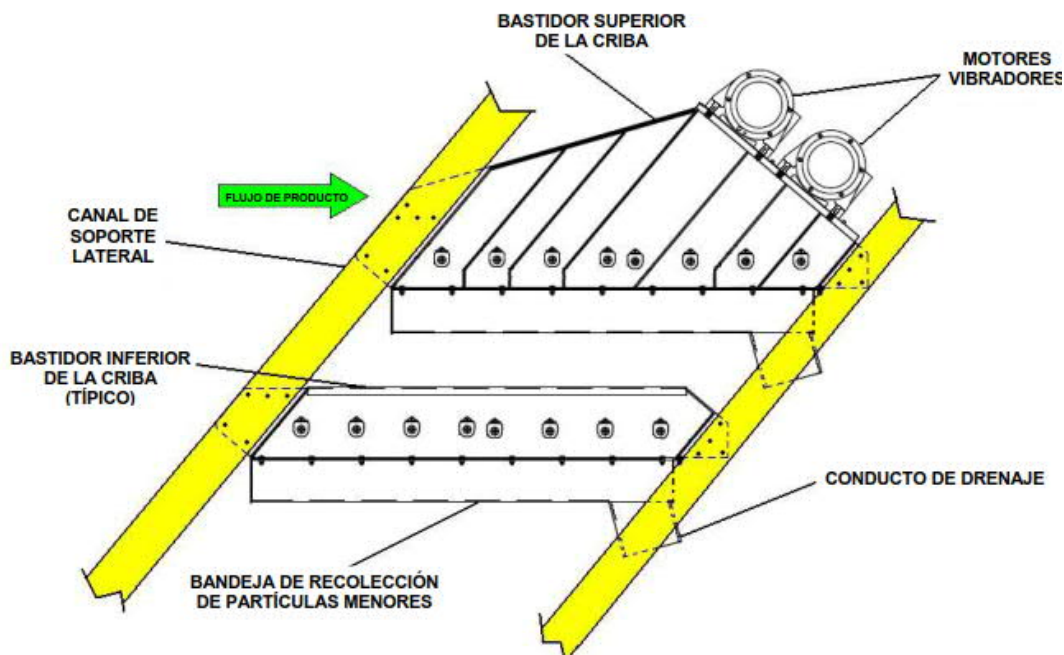


Figura 24. Bastidores de la criba (Manual criba Derrick)

g) Tolva de recolección de partículas mayores

La tolva de recolección de partículas mayores recibe todo el material de mayor tamaño que pasa por los extremos de los bastidores de la criba. Su configuración cónica (menor en la parte superior y mayor en la parte inferior) hace que las partículas mayores se dirijan hacia abajo, en dirección al conector de descarga soldado a la parte inferior de la tolva. La tolva incluye provisiones de montaje para el múltiple de partículas menores y está asegurada al lado inferior del bastidor de soporte de Stack Sizer. Todas las superficies interiores se encuentran revestidas de goma para proporcionar alta durabilidad.

h) Caja de empalmes eléctricos

En la caja de empalmes eléctricos se proporcionan las conexiones de alimentación eléctrica de los motores vibradores. La caja de empalmes se monta en un canal vertical soldado al bastidor de soporte del lado derecho de la máquina. Hay una regleta de terminales ubicada dentro de la caja que conecta los motores a la fuente de alimentación de la instalación y los cables se encuentran sujetos con abrazaderas de alivio. Existen etiquetas de seguridad y de configuración de energía instaladas en la cubierta delantera, la cual cuenta con un sello de juntas para evitar el ingreso de humedad.

i) Bastidor de soporte

El bastidor de soporte es una estructura de acero soldado que contiene provisiones de montaje para los bastidores de la criba, la caja de empalmes eléctricos, los motores vibradores y la tolva de recolección de partículas mayores (con el múltiple de recolección de partículas menores instalado). La placa de datos de Stock Sizer se encuentra montada del

lado derecho del bastidor de soporte, cerca de la caja de empalmes eléctricos. El ángulo de montaje de los bastidores de la criba se establece a través del bastidor de soporte.

#### j) Sistema de rociadura

El sistema de rociadura opcional (Figura 25) disponible para Stack Sizer rocía agua en cada bastidor de la criba para optimizar la separación de partículas mayores y menores. Se proporcionan barras de rociadura individuales para una cantidad de hasta cinco plataformas. Este sistema consta de barras de rociadura con cinco boquillas distribuidas a lo largo del bastidor de cribado asociado y de un múltiple montado en el lateral del bastidor del canal. Las válvulas de bola de las barras de rociadura de los bastidores inferiores de la criba, permiten que cada barra se pueda deshabilitar en forma individual para el mantenimiento.

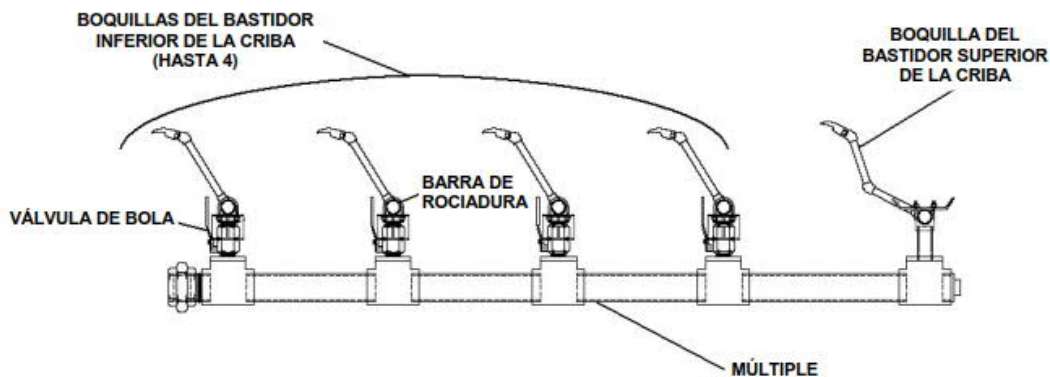


Figura 25. Sistema de esparido de agua (Manual criba Derrick)

#### 2.4.2.3. Funcionamiento

La pulpa compuesta por agua y mineral de proceso se distribuye equitativamente a los alimentadores dedicados que abastecen cada bastidor de la criba. La acción vibratoria de los motores proporciona las fuerzas G requeridas para facilitar el proceso de cribado.

El agua y las partículas de tamaño menor pasan a través de cada panel de la criba y fluyen hacia el interior de una bandeja de recolección de partículas menores. Un conducto en la parte inferior de la bandeja se vacía en el múltiple de partículas menores, que transporta el material hacia la brida de descarga de partículas menores. La vibración transporta partículas de mayor tamaño por las superficies superiores de los paneles de la criba en dirección hacia el extremo en el que estas caen hacia la tolva de partículas mayores. Luego, el material de mayor tamaño se descarga a través del puerto de bridas del lado inferior de la tolva de partículas mayores.

## CAPITULO 3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL PARA ANALIZAR LAS VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE ANÁLISIS EN LÍNEA.

### 3.1. Introducción

En este capítulo se definió la metodología a experimental para analizar las variables que intervienen, y cómo se realizara su evaluación.

### 3.2. Análisis de datos

Se analizó la base de datos estadística de la Minera Saucito que opera en el estado de Zacatecas, la tabla de jerarquía identifica el resultado de las intensidades, modificando la variable de clasificación que consiste en el empleo de Cribas de alta frecuencia e Hidrociclones, con la finalidad de evaluar el impacto que tienen los tamaños de partícula y la forma en el analizador de elementos en línea Courier, en donde se evalúan las variables por separado (Figura 26).

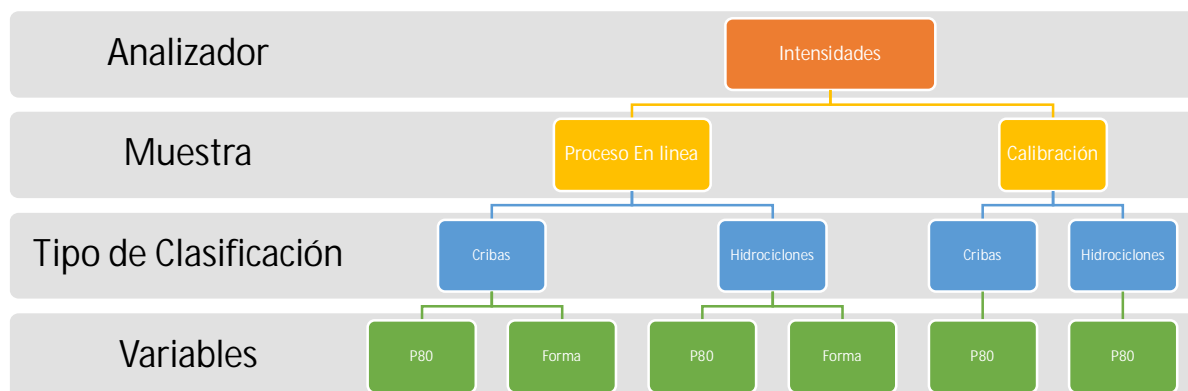


Figura 26. Tabla de jerarquías para identificar las variables que influyen en la respuesta de fluorescencia.

### 3.3. Evaluación estadística

Utilizando la prueba t de dos muestras, del software estadístico Minitab® 17.1.0, para realizar una prueba de hipótesis y calcular un intervalo de confianza, de la diferencia entre dos medias poblacionales cuando se desconocen las desviaciones estándar de la población, s. Para una t de dos muestras de dos colas:

$$H_0: \mu_1 - \mu_2 = d_0 \quad \text{contra} \quad H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq d_0$$

donde  $\mu_1$  y  $\mu_2$  son las medias poblacionales y  $d_0$  es la diferencia hipotética entre las dos medias poblacionales.

### 3.4. Muestreo en línea

La pulpa con los finos de los circuitos de molienda primaria y secundaria se conducen por medio de una tubería hacia el muestreador metalúrgico, donde se hace un primer corte o corte primario que entrega al multiplexor un volumen de muestra a razón de 150 l/min. El flujo que pasa a través del Multiplexor se corta nuevamente para entregar al Analizador de elementos en línea un flujo de 10 l/min siendo un total de 30 litros.

Una vez que el analizador elemental en línea recibe la muestra desde el Multiplexor, entra a la sonda de medición (Figura 27) donde por medio de fluorescencia de rayos X se analiza el contenido de la muestra, dando como resultado una intensidad específica por cada elemento detectado de metal de interés siendo los siguientes: Zinc (Zn) Plomo (Pb), Hierro (Fe), Plata (Ag) Solidos (Sol).

Los resultados se despliegan tanto en la pantalla táctil del analizador de elementos en línea como en los monitores del cuarto de control. Cada 15 minutos se actualiza la información de los contenidos de elementos de interés de cada uno de los flujos.

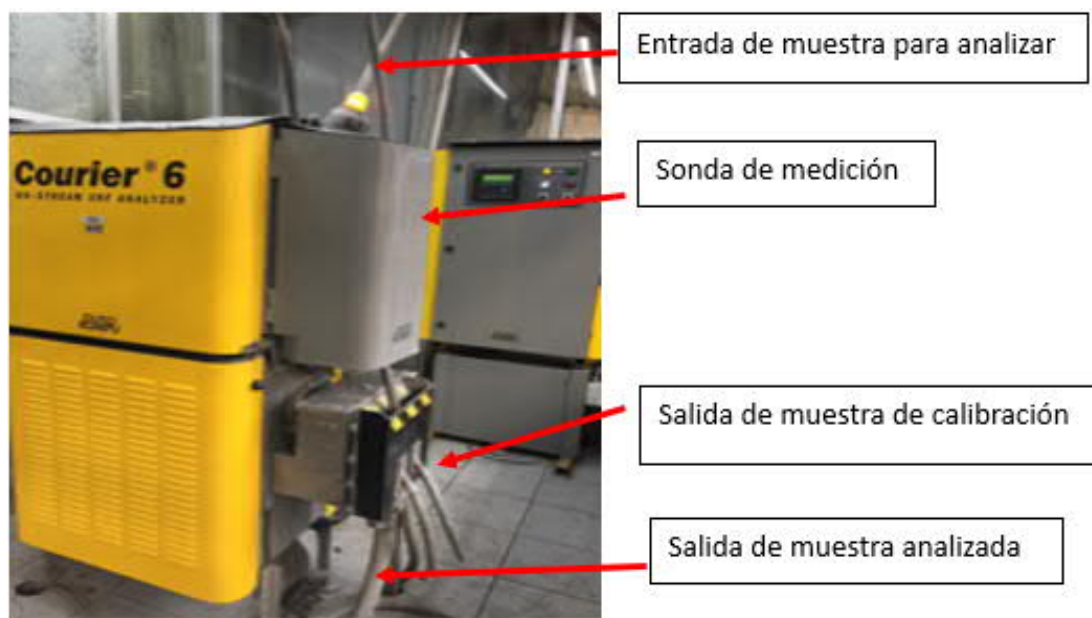


Figura 27. Toma de muestra de calibración

En paralelo, el Multiplexor hace un corte del mismo flujo de muestra cada cinco minutos para generar una muestra compósito de dos kilos (Figura 28), cada 12 horas es recolectada por personal de laboratorio. Después de secarse en un horno de secado industrial, la muestra se pulveriza y se fracciona hasta obtener lotes de cinco gramos que son analizados químicamente por medio de absorción atómica.

Una vez que el laboratorio entrega los resultados de sus análisis, son comparados contra el promedio de 12 horas entregado por el analizador de elementos en línea. En caso de existir una diferencia mayor a un cinco por ciento entre ambos resultados, se realiza un nuevo modelo de calibración multivariable por medio del software Outocal. El nuevo modelo es

actualizado en la computadora industrial del analizador de elementos en línea, este proceso se realiza constantemente para asegurar confiabilidad de los resultados entregados.



Figura 28. Muestra compósito

### 3.5. Muestras de calibración

En la pantalla de analizador de elementos en línea se inicia el proceso de toma de las muestras de calibración accionando el botón de muestra de calibración, el analizador mientras está analizando la muestra, la parte electrónica inicia tomando muestra de pulpa en un cortador que paso por el analizador. (Figura 29)

Estas muestras generan un número de identificación donde el analizador va a almacenar las intensidades de los canales instalados en el analizador de elementos en línea.

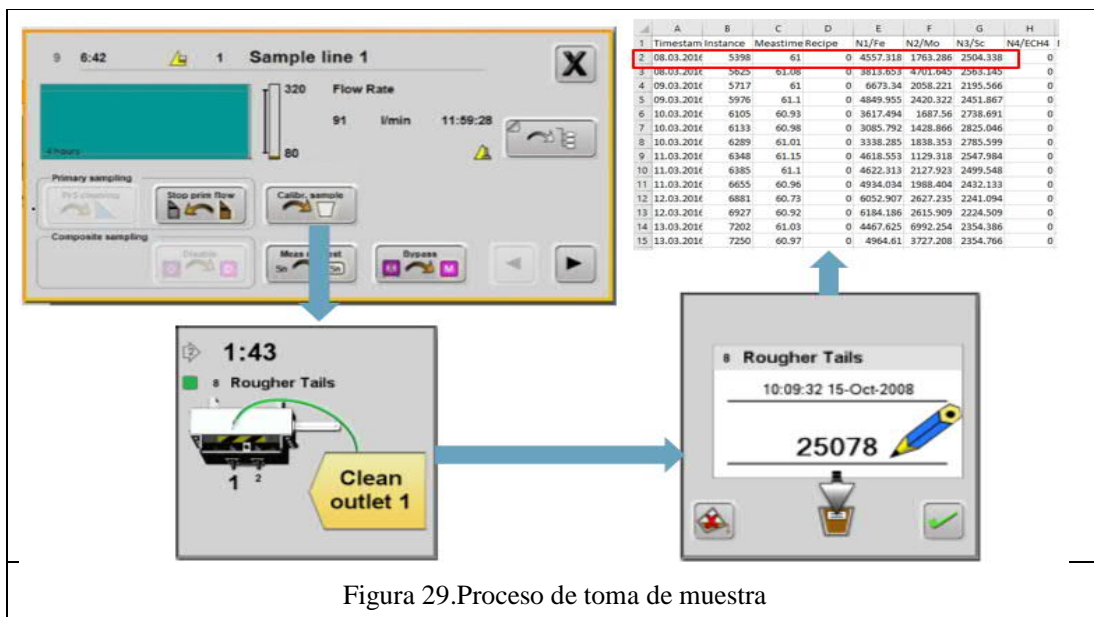


Figura 29. Proceso de toma de muestra

Una vez terminado el proceso de toma de muestra del analizador, la muestra representativa de 1Kg es almacenada en una cubeta 20 litros para después ser llevada al laboratorio para filtrarla y secarla para determinar el % de Sólidos y finalmente determinar el ensaye químico el Zinc (Zn) Plomo (Pb), Hierro (Fe), Plata (Ag) (Figura 30)

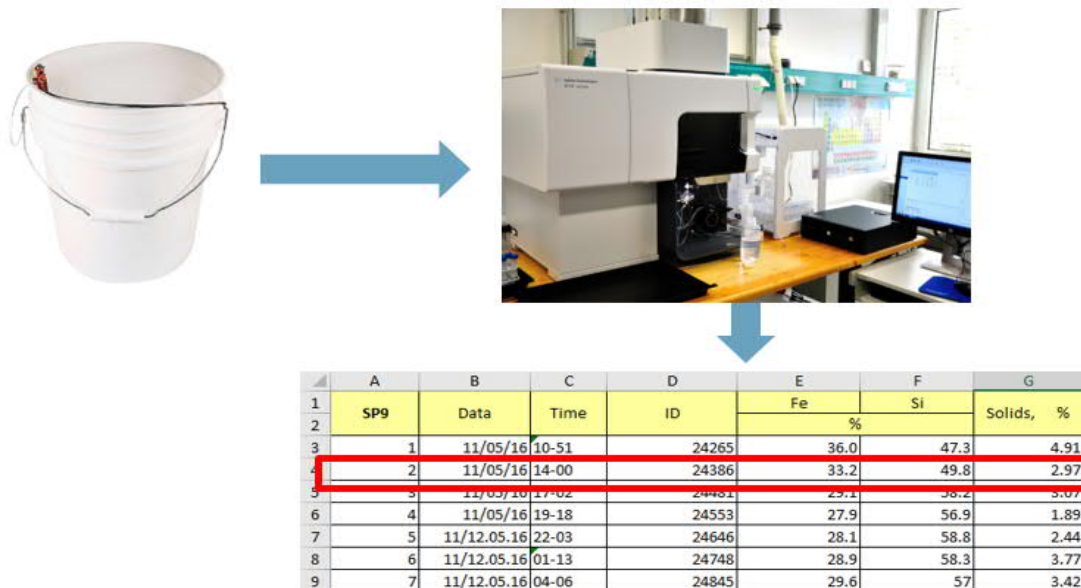


Figura 30. Etapas del análisis de las muestras tomadas del analizador de elementos en línea

### 3.6. Elaboración de modelos multivariados de calibración

En la tabla 5 se mostró la cantidad de muestras que se requieren para elaborar un modelo multivariable de calibración, una vez ensayadas químicamente por el laboratorio.

Del analizador de elementos en línea se obtienen las intensidades de las muestras de calibración, Tanto los ensayos químicos como las intensidades son cargadas al software del Outocal versión 2.5.3 (Figura 31)

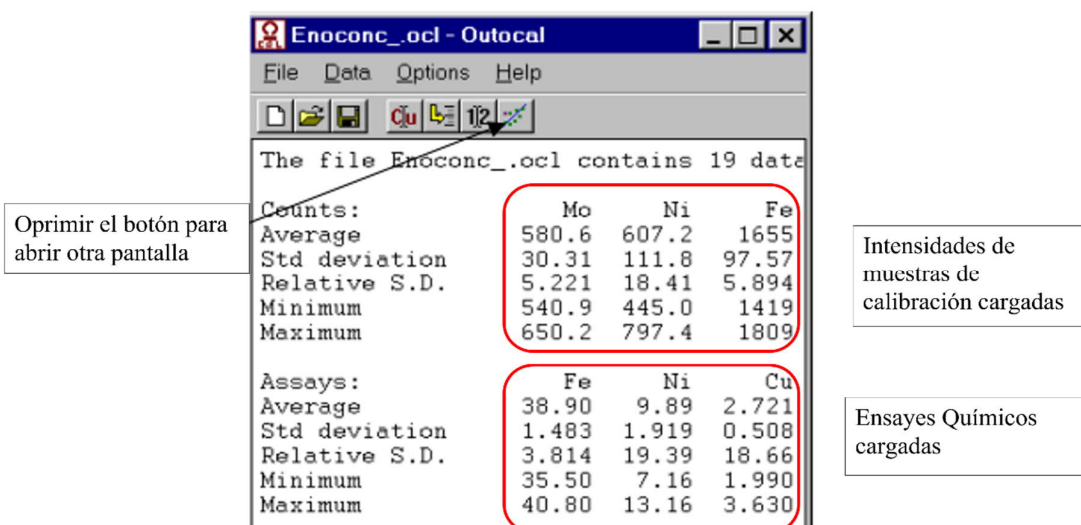
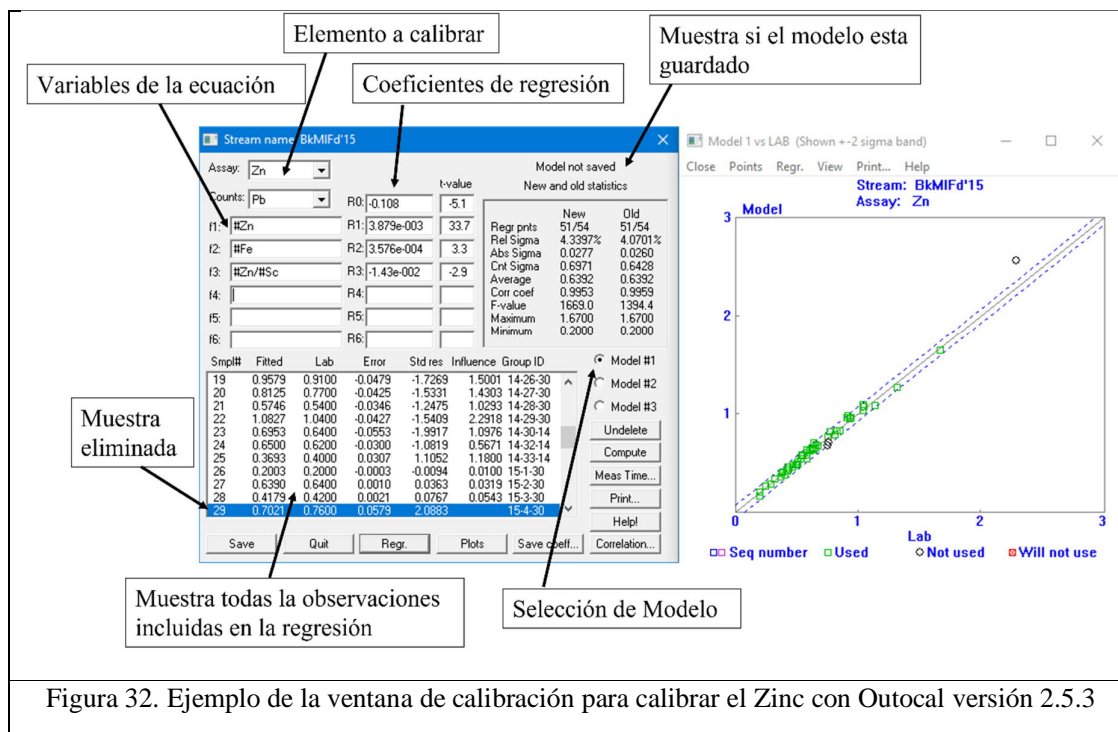


Figura 31 Uso de software Outocal versión 2.5.3

La Figura 32 muestra la ventana del software de Outocal donde se van a realizar los modelos de los elementos de interés que son: gr/ton de Plata, % de Plomo, % de Zinc, % de Hierro y % de Sólidos, en esta ventana también se muestra las variables de la ecuación que son intensidades almacenadas por el Courier que son: Plomo, Plata, Hierro, Solidos y Zinc para realizar el modelo multivariable utilizando el software de Outocal, el resultado nos muestra:

- Coeficientes de una regresión lineal Multivariable ( $R_0, R_1 \dots R_6$ )
- Coeficiente de correlación ( $r$ )
- Modelo de calibración Multivariable con las variables de la ecuación
- T-valor
- Error Absoluto ( $\sigma_{abs}$ )
- Error Relativo ( $\sigma_{rel}$ )
- F-Valor
- Influencia de cada observación ( $\epsilon$ )
- Diagrama de Dispersión



A continuación se muestran los criterios para elaborar un buen modelo multivariable de calibración:

- El número de variables debe de ser menor al número de observaciones dividido entre dos
- Coeficiente de correlación  $r_0$  debe de ser mayor de 0.8
- Todos los valores absolutos de  $t$  de las variables deben ser mayores a 2
- El valor de prueba  $F$  debe de ser mayor a 10
- El error de conteo menor de 0.5 – 0.7 del error total

### 3.7. Microscopia óptica

Se toma una muestra de los compósitos de los turnos y se analiza con un microscopio óptico, para determinar las partículas libres. La muestra se coloca en la platina y se posiciona en el microscopio, desplazándola manualmente hacia el centro de la placa hasta que se muestre la sección deseada en la imagen en vivo.

La platina se fija en la posición cero, mediante un tornillo se puede ajustar la potencia de la retención. Al enfocar la platina se eleva o baja el objetivo mediante el mando de enfoque. Este enfoque se realiza de forma manual o motorizada en función del modelo del equipo. En cuanto el punto de muestra deseado se encuentre en el foco del objetivo, se mostrará de forma nítida. Las variables que pueden ser medidas de forma manual o automática de una imagen son longitud, área, perímetro, ángulos, taxonomía, cuentas, radio circular y semiejes elípticos (Figura 33)

Una vez que se adquiere la imagen, se define el umbral creando una capa binaria. Se selecciona una de las herramientas de medición disponibles y se realiza la medición (manual o automática). Los resultados se registran en una tabla estadística y también puede representarse como una gráfica.



Figura 33. Ejemplo de medición de longitud de un grano (Guía de usuario Nikon NIS-Elements AR)

### 3.8. Evaluación de la morfología

Las partículas pueden clasificarse de acuerdo con su redondez, como se menciona en el artículo "Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles<sup>xiii</sup>" (Figuras 34 y 35).

Basados en ese ejemplo de clasificación morfológica se elabora una tabla donde se determinó el diámetro de Sauter de las partículas de Esfalerita, Galena y Pirita y se compara con la relación de longitud máxima entre longitud mínima para determinar cómo están distribuidas las partículas de minerales, con la comparación de las imágenes obtenidas del microscopio nos ayudó a validar si estas partículas son redondas o prismáticas o angulosas. Tabla 10



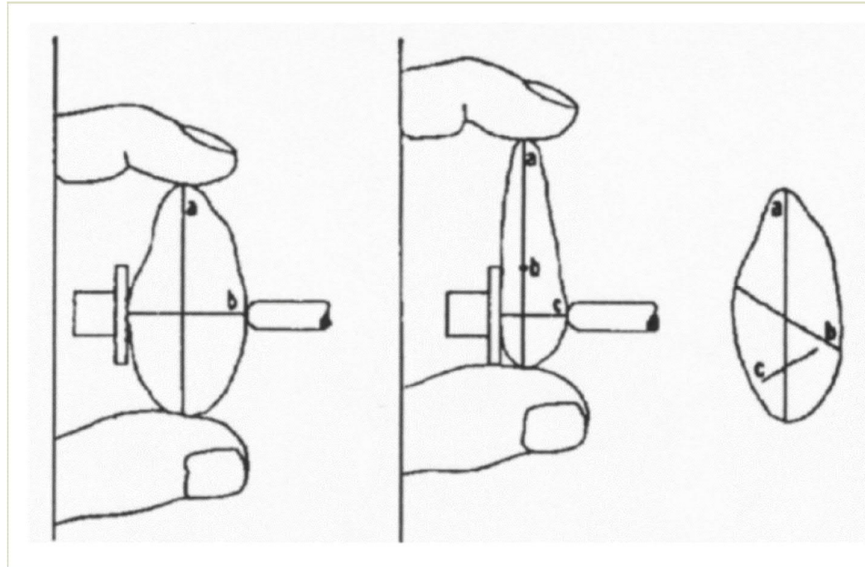


Figura 34. La imagen muestra esquemáticamente los puntos de medición de las partículas (Krumbein, 1941).

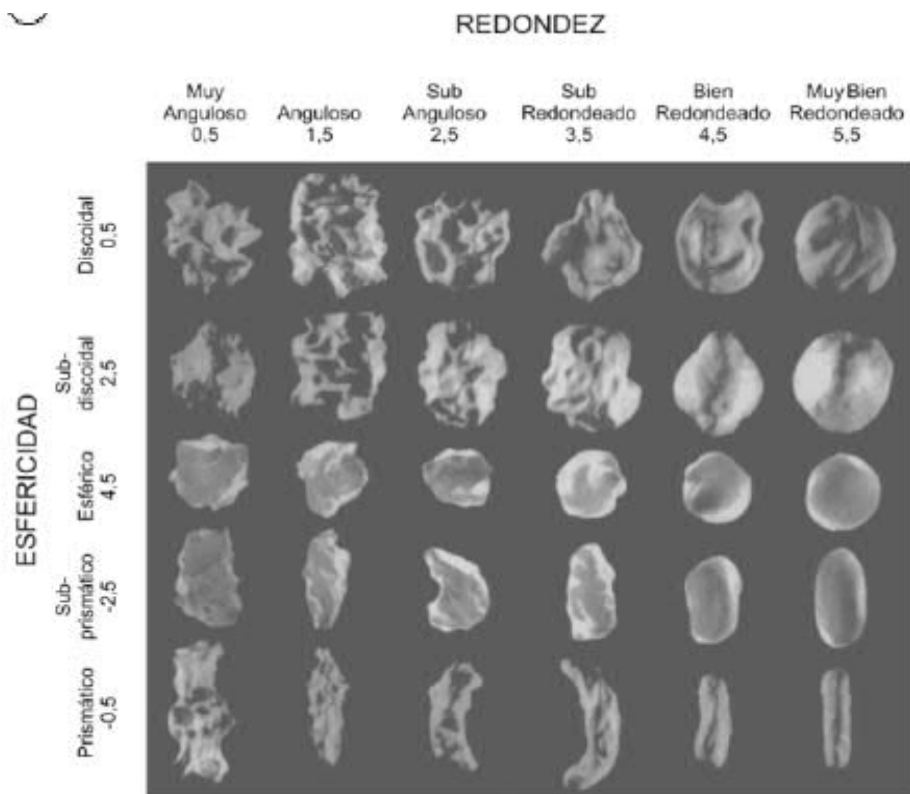


Figura 35. Cuadro comparativo de redondez y esfericidad (Powers, 1982)<sup>xiv</sup>

La Figura 36 muestra el proceso para realizar el análisis de la morfología de las partículas, cuando la muestra es analizada en el microscopio, se procesan las imágenes, después son procesados los datos obtenidos del software, donde se obtiene el área, perímetro longitud máxima y longitud mínima.

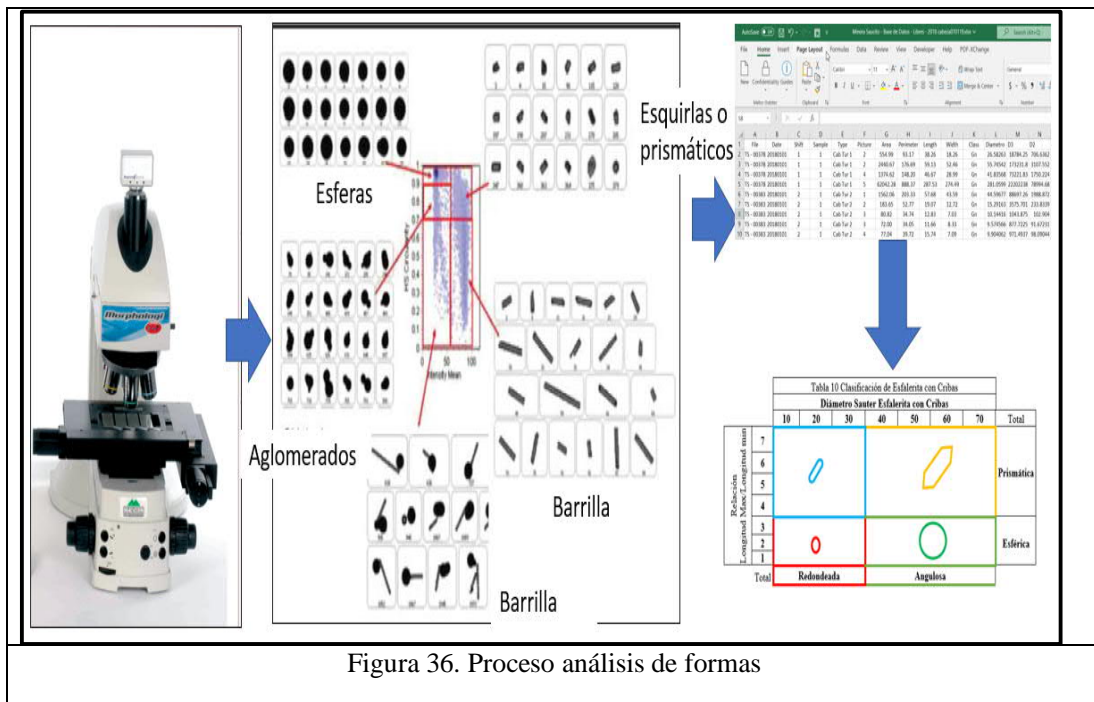


Figura 36. Proceso análisis de formas

La tabla 10 muestra el diámetro de Sauter y la relación de la longitud máxima entre la mínima de las partículas, los resultados de las observaciones del diámetro de Sauter fueron estratificadas en 10,20,30,40,50,60 y 70. La relación de longitud máxima entre longitud mínima fue estratificada 1,2,3,4,5,6, y 7. Con esto nos ayuda a identificar cuáles son redondeadas o angulosas y esféricas y prismáticas.

		Diámetro Sauter Esfalerita con Cribas						Total	
		10	20	30	40	50	60		70
Relación Longitud Max/Longitud Min	7								Prismática
	6								
	5								
	4								
	3								Esférica
	2								
	1								
Total		Redondeada			Angulosa				

## CAPITULO 4. ANÁLISIS DE LAS PRINCIPALES VARIABLES DEL PROCESO UTILIZANDO EL MÉTODO DE EVALUACIÓN DE ESTADÍSTICA T DE DOS VARIABLES.

### 4.1 Introducción

En este capítulo se evaluaron las variables individualmente para identificar si existen diferencias en los dos periodos, estas variables son: los tonelajes alimentados a la planta, contenidos metálicos, de tamaño de partícula, forma de las partículas, modelos de calibración del analizador de elementos en línea y su comparación estadística en ambos periodos usando cribas de alta frecuencia e Hidrociclones, para identificar el impacto.

### 4.2 Evaluación estadística del tamaño de partícula y tonelaje por turno utilizando cribas vs hidrociclones

Usando el programa Minitab® 17.1.0, se realizan las pruebas estadísticas de T para comparar el P80, el tonelaje procesado y los contenidos metálicos en dos periodos usando Cribas de alta frecuencia e Hidrociclones (Figura 37).

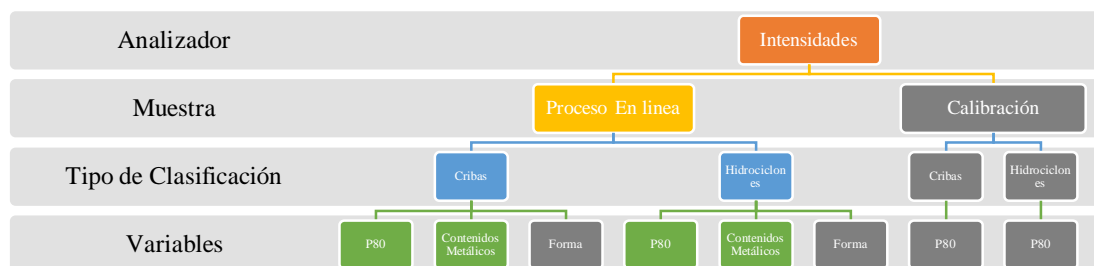


Figura 37. Procedimiento empleado para realizar pruebas estadísticas de P80 y contenidos metálicos en los dos periodos de clasificación.

El resultado de la prueba T es utilizada para evaluar la hipótesis nula y una hipótesis alternativa, donde se hace un planteamiento de una hipótesis nula que nos indica si las medias son iguales y la hipótesis alternativa donde las medias son diferentes.

Si el valor de P-Valor obtenido de la prueba de hipótesis es menor a 0.05 entonces estadísticamente son diferentes.

#### 4.2.1 Evaluación de tamaño de partícula P80

La Tabla 10 muestra que el resultado estadístico del tamaño de partícula por medio de la prueba de T indica que la media con cribas es de 67.87 micrómetros y con hidrociclones la media es 70.57 por lo que estadísticamente P-Valor es menor a 0.05 por lo que estadísticamente concluimos que son diferentes.

Tabla 11. Prueba T e Índice de confianza de dos muestras: Comparación de tamaño de partícula P80 obtenidos para cribas e hidrociclones.

Periodo	N	Media	Desviación Estándar (StDev)	Error estándar
Cribas	447	67.87	6.70	0.32
Hidrociclones	112	70.54	6.44	0.61

Diferencia	$= \mu (1) - \mu (2)$		
Estimación por diferencia:	-2.667		
95% CI por Diferencia:	(-4.022, -1.313)		
T-Prueba de Diferencia = 0 (vs $\neq$ ):	T-Valor = -3.89	P-Valor = 0.000	DF = 176

La gráfica de caja nos muestra la variabilidad en ambos periodos (Figura 38), el histograma compara el comportamiento en ambos periodos (Figura 39), en donde el periodo de hidrociclones muestra una desviación estándar mayor con respecto a las cribas. Esta diferencia puede atribuirse a que existió una curva de aprendizaje por parte del personal de operación al regresar a un sistema de hidrociclones, cuando el proceso se encontraba estable durante la operación con el sistema de cribas.

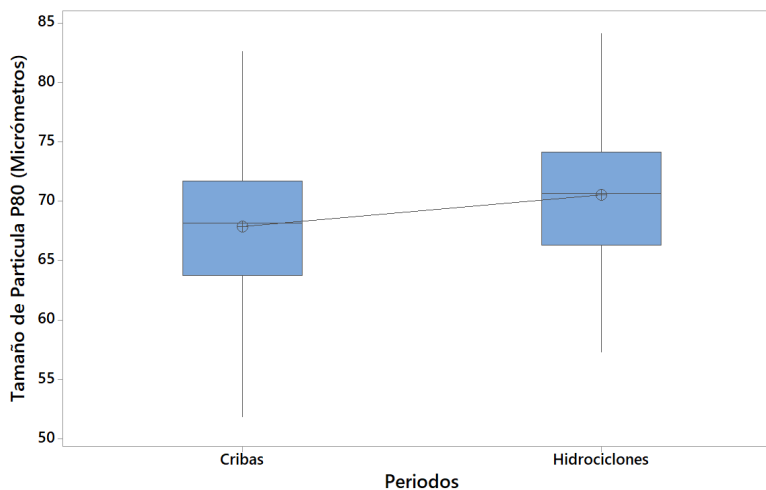


Figura 38. Gráfico de caja del tamaño de partícula P80.

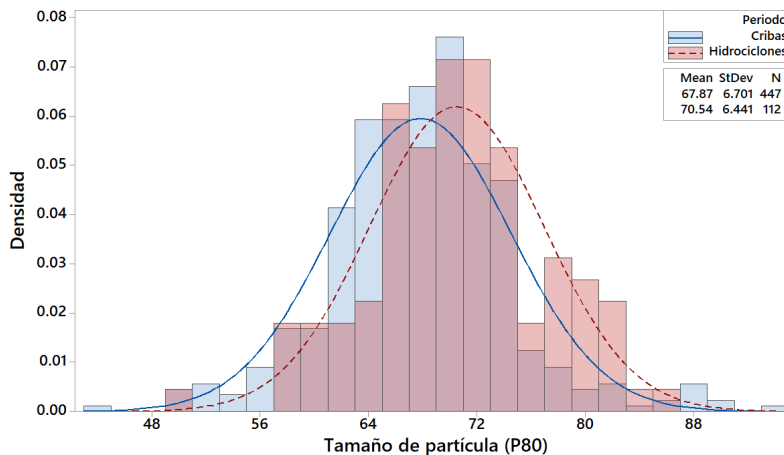


Figura 39. Histograma del tamaño de partícula P80.

A continuación, analizaremos el comportamiento del tonelaje procesado por la unidad minera, donde se buscará evaluar si existe una diferencia estadística significativa de esta variable.

#### 4.2.2 Evaluación de tonelaje alimentado.

La Tabla 12 muestra que el resultado estadístico del tonelaje alimentado a la planta por turno por medio de la prueba de T indica que la media con cribas es de 1947 y con hidrociclones la media es 1,953 por lo que estadísticamente P-Valor es mayor a 0.05 por lo que estadísticamente se concluye que son iguales.

Tabla 12. Prueba T e Índice de confianza de dos muestras: Comparación del tonelaje por turno obtenidos para cribas e hidrociclones.

Periodo	N	Media	Desviación Estándar (StDev)	Error estándar
Cribas	447	1947	147	6.9
Hidrociclones	112	1953	112	11

Diferencia	= $\mu (1) - \mu (2)$		
Estimación por diferencia:	-5.1		
95% CI por Diferencia:	(-30.1, 19.9)		
T-Prueba de Diferencia = 0 (vs $\neq$ ):	T-Valor = -0.40	P-Valor = 0.0686	DF = 216

El resultado de la prueba T muestra que en el tonelaje alimentado al molino no existe diferencia significativa en ambos periodos por lo que se acepta la hipótesis nula, que indica que las medias son iguales (Tabla 13 y Figuras 40, 41).

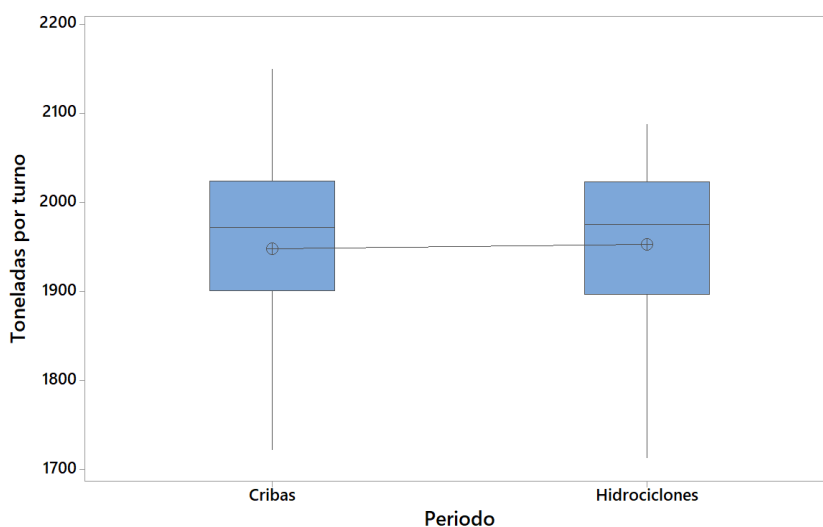


Figura 40. Gráfico de caja del tonelaje por turno

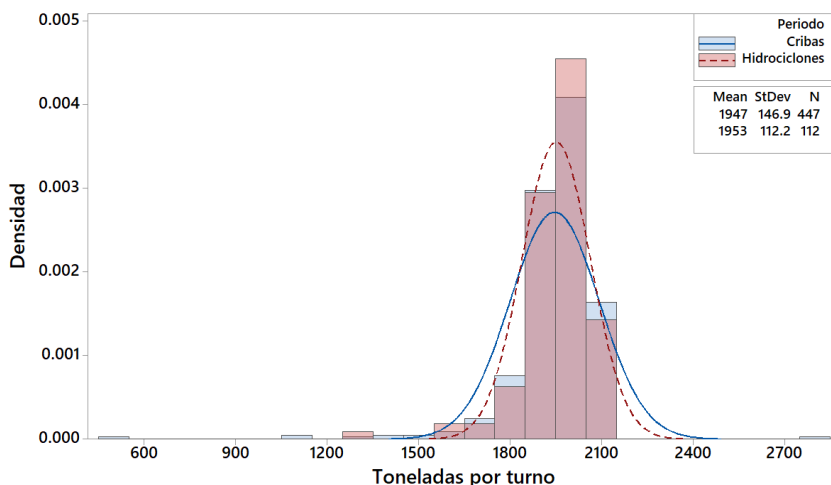


Figura 41. Histograma del tonelaje del turno.

Tabla 13. Diferencia existente del tamaño de partícula P80 y el tonelaje alimentado entre ambos periodos con cribas e hidrociclones.

	Media Periodo Cribas	Media Periodo Hidrociclones	P-Valor ( $<0.05$ )
P80	67.87	70.54	0.000
Tonelaje	1947	1953	0.0686

#### Puntos importantes:

La media del tamaño de partícula P80 nos indica que las medias son diferentes en los periodos de cribas e Hidrociclones.

La media de los tonelajes por turno de ambos periodos con cribas e hidrociclones estadísticamente no existe diferencia ya que el P-Valor es mayor a 0.05. Esto demuestra que esta variable no es significativa en el tipo de clasificación que se desee utilizar ya sea con hidrociclones o cribas.

A continuación, se describe una evaluación donde se revisarán estadísticamente los contenidos metálicos de los elementos Plata, Plomo Zinc Cobre y Hierro del periodo con Cribas e Hidrociclones.

### 4.3 Evaluación de contenidos metálicos

La evaluación de los contenidos metálicos se realiza para determinar la cantidad de metal contenido en un volumen total expresado en tonelaje, es decir integrar en la evaluación las variables de tonelaje y ley de cabeza. El contenido metálico es resultado de la multiplicación del tonelaje por turno y el porcentaje del elemento dividido entre cien por ciento. Con la Ecuación 12 los contenidos a analizar son Plata, Plomo, Zinc, Hierro y Cobre.

$$\text{Contenidos Metálicos (Pb, Zn, Fe y Cu)} = \frac{\text{Toneladas}}{\text{Turno}} \times \frac{\% \text{ Metal}}{100\%} \quad \text{Ecuación 12}$$

La ecuación 13 se utiliza para calcular los contenidos de plata, el resultado de plata entregado es en gramos de plata por toneladas.

$$\text{Contenidos Metálicos Plata} = \frac{\text{Toneladas}}{\text{Turno}} \times \frac{\text{g Metal}}{\text{Toneladas}} \quad \text{Ecuación 13}$$

#### 4.3.1 Contenidos metálicos de Plata

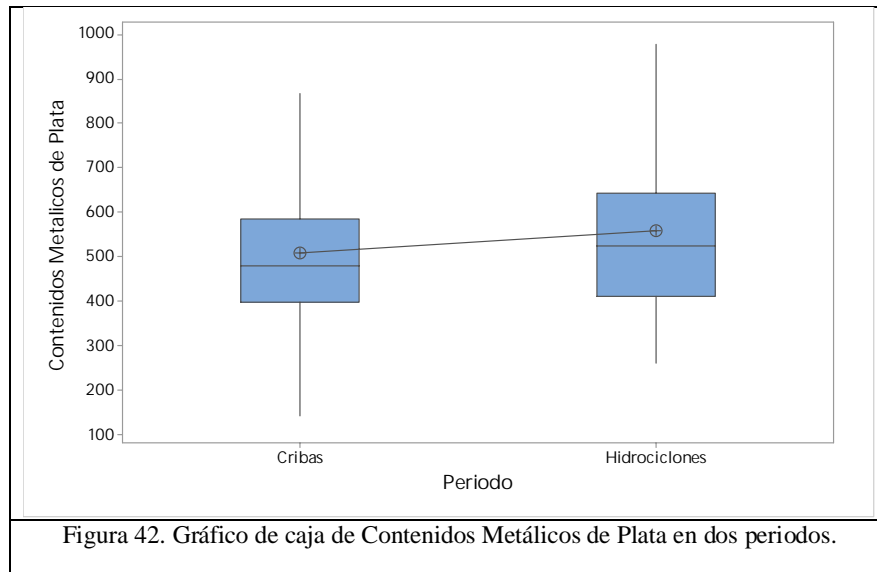
La Tabla 14 muestra que el resultado estadístico de los contenidos metálicos de Plata por medio de la prueba de T, indica que la media con cribas es de 510 y con hidrociclones la media es 561 por lo que estadísticamente P-Valor es menor a 0.05 por lo que estadísticamente concluimos que las medias son diferentes.

Tabla 14. Prueba T e Índice de confianza de dos muestras: Comparación de Contenidos metálicos de Plata en dos periodos cribas e hidrociclones.

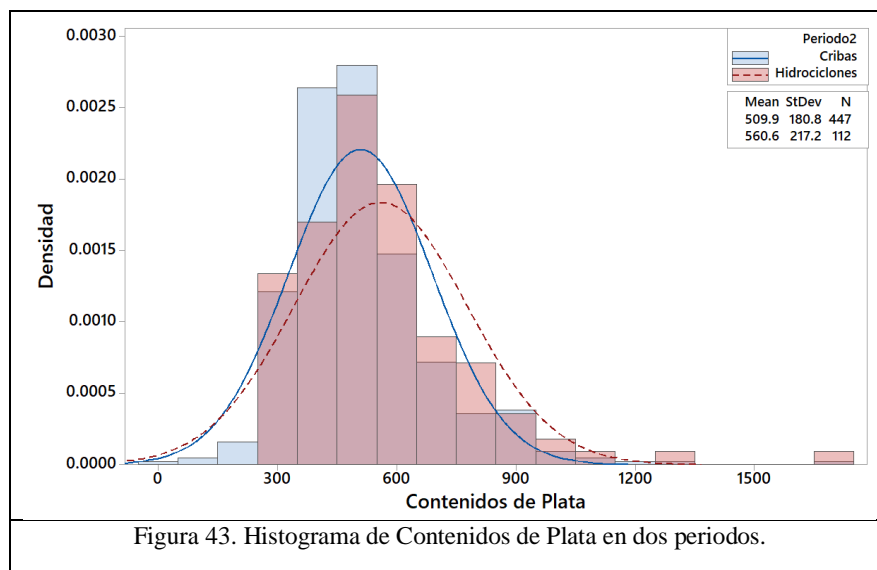
Periodo	N	Media	Desviación Estándar (StDev)	Error estándar
Cribas	447	510	181	8.6
Hidrociclones	112	561	217	21

Diferencia	= $\mu (1) - \mu (2)$		
Estimación por diferencia:	-50.8		
95% CI por Diferencia:	(-94.7, -6.8)		
T-Prueba de Diferencia = 0 (vs $\neq$ ):	T-Valor = -2.28	P-Valor = 0.024	DF = 151

La Figura 42 muestra el gráfico de caja de los contenidos metálicos con cribas vs hidrociclones, se observa la variabilidad.



La Figura 43 muestra el histograma de los contenidos de plata en los periodos donde la desviación estándar es mayor con hidrociclones.





### 4.3.2 Contenidos metálicos de Plomo

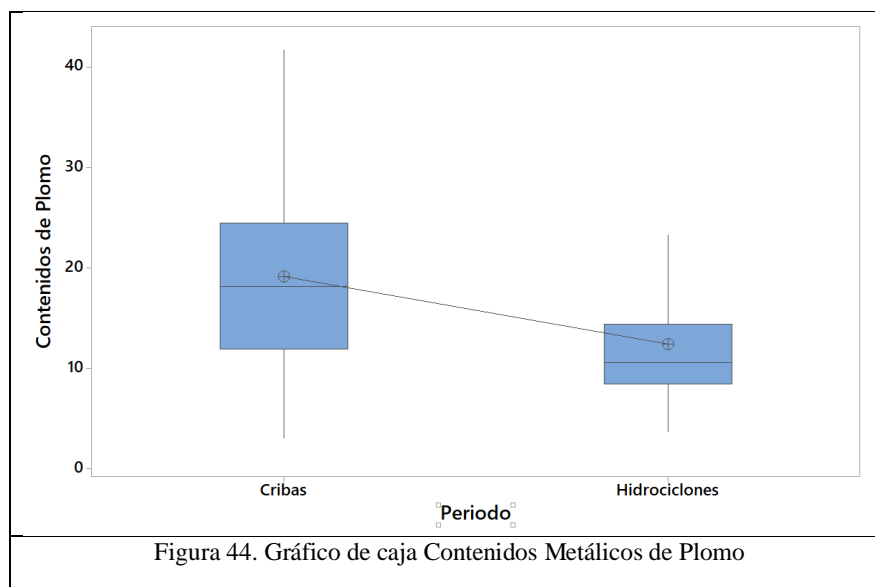
La Tabla 15 muestra que el resultado estadístico de los contenidos metálicos de Plomo por medio de la prueba de T indica que la media con cribas es de 19.15 y con hidrociclones la media es 12.44 por lo que estadísticamente P-Valor es menor a 0.05 por lo que estadísticamente concluimos que las medias son diferentes.

Tabla 15. Prueba T e Índice de confianza de dos muestras: Comparación de Contenidos metálicos de Plomo en dos periodos con cribas e hidrociclones.

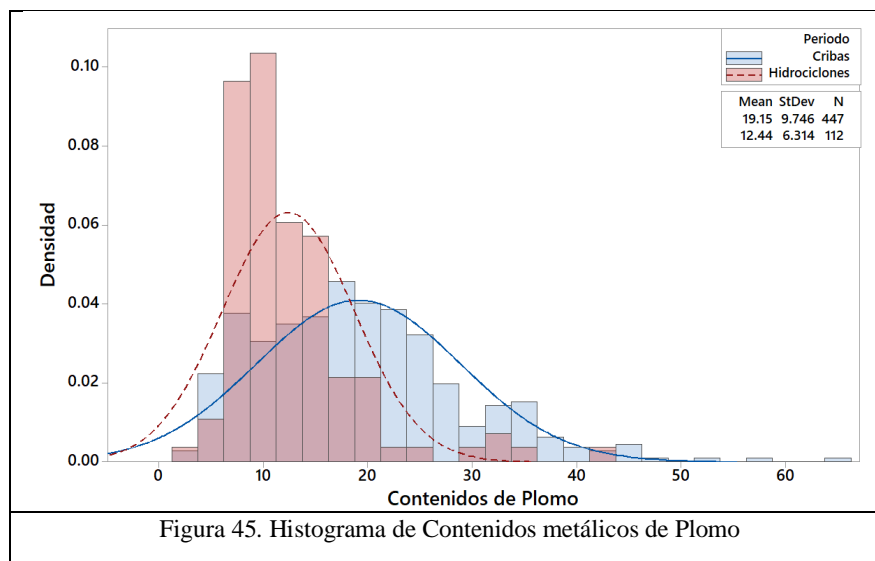
Periodo	N	Media	Desviación Estándar (StDev)	Error estándar
Cribas	447	19.15	9.75	0.46
Hidrociclones	112	12.44	6.31	0.60

Diferencia	= $\mu (1) - \mu (2)$		
Estimación por diferencia:	6.716		
95% CI por Diferencia:	(5.231, 8.200)		
T-Prueba de Diferencia = 0 (vs $\neq$ ):	T-Valor = 8.91	P-Valor = 0.000	DF = 260

La Figura 44 muestra el gráfico de caja del comportamiento de contenidos metálicos de plomo en los periodos con cribas e hidrociclones, cabe mencionar que en el periodo de hidrociclones se presenta menor variabilidad de contenidos metálicos de plomo comparado con las cribas.



La Figura 45 muestra el histograma de los contenidos metálicos de plomo en ambos periodos, donde la desviación estándar es mayor con cribas.



### 4.3.3 Contenidos Metálicos de Zinc

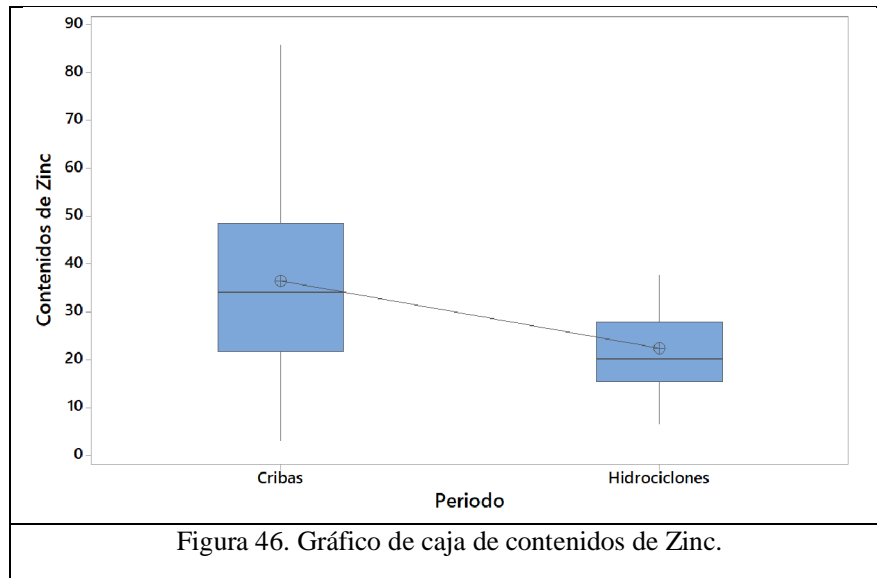
La Tabla 16 muestra que el resultado estadístico de los contenidos metálicos de Zinc por medio de la prueba de T indica que la media con cribas es de 36.4 y con hidrociclones la media es 22.32 por lo que estadísticamente P-Valor es menor a 0.05 por lo que estadísticamente concluimos que las medias son diferentes.

Tabla 16. Prueba T e Índice de confianza de dos muestras: Comparación de Contenidos metálicos de Zinc en dos periodos con cribas e hidrociclones.

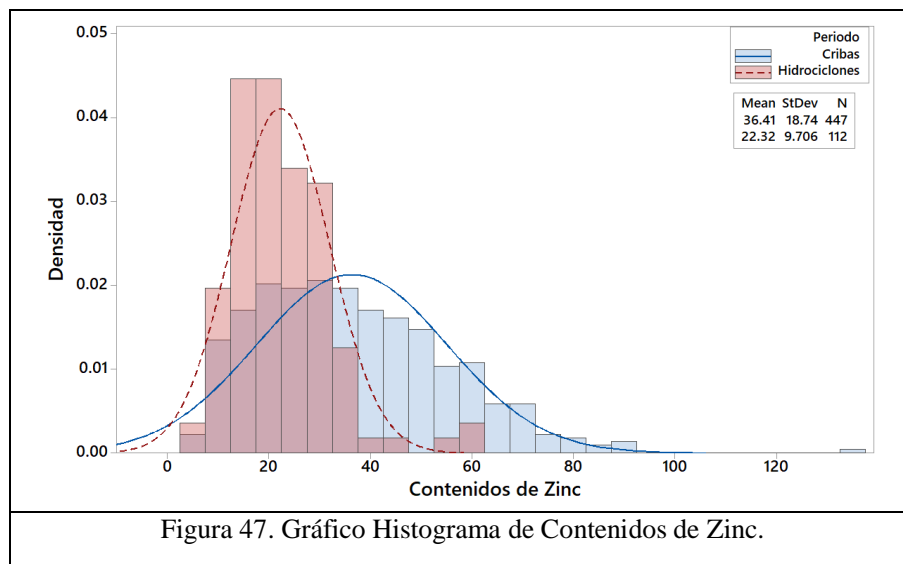
Periodo	N	Media	Desviación Estándar (StDev)	Error estándar
Cribas	447	36.4	18.7	0.89
Hidrociclones	112	22.32	9.71	0.92

Diferencia	$= \mu (1) - \mu (2)$		
Estimación por diferencia:	14.10		
95% CI por Diferencia:	(11.59, 16.61)		
T-Prueba de Diferencia = 0 (vs $\neq$ ):	T-Valor = 11.05	P-Valor = 0.000	DF = 341

La Figura 46 muestra la gráfica de cajas en donde se observa la diferencia en ambos periodos el periodo con cribas muestra más variabilidad que el periodo con hidrociclones.



La Figura 47 muestra el histograma de los contenidos metálicos de zinc en ambos periodos, donde la desviación estándar es mayor con cribas.



#### 4.3.4 Contenidos Metálicos de Hierro

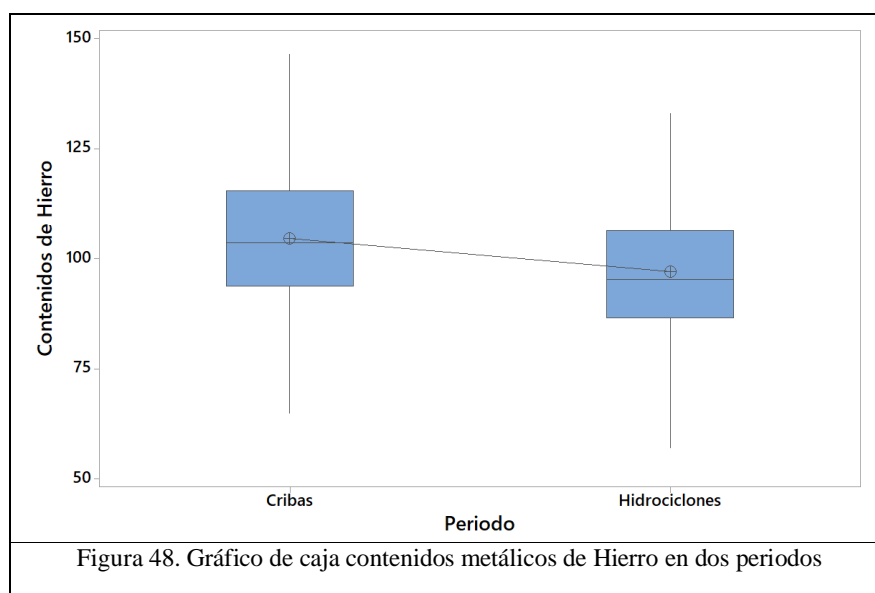
La Tabla 17 muestra que el resultado estadístico de los contenidos metálicos de Hierro por medio de la prueba de T-student indica que la media con cribas es de 104.5 y con hidrociclones la media es 97.1 por lo que estadísticamente P-Valor es menor a 0.05 por lo que estadísticamente concluimos que las medias son diferentes.

Tabla 17. Prueba T e Índice de confianza de dos muestras: Comparación de Contenidos metálicos de Hierro en dos periodos con cribas e hidrociclones.

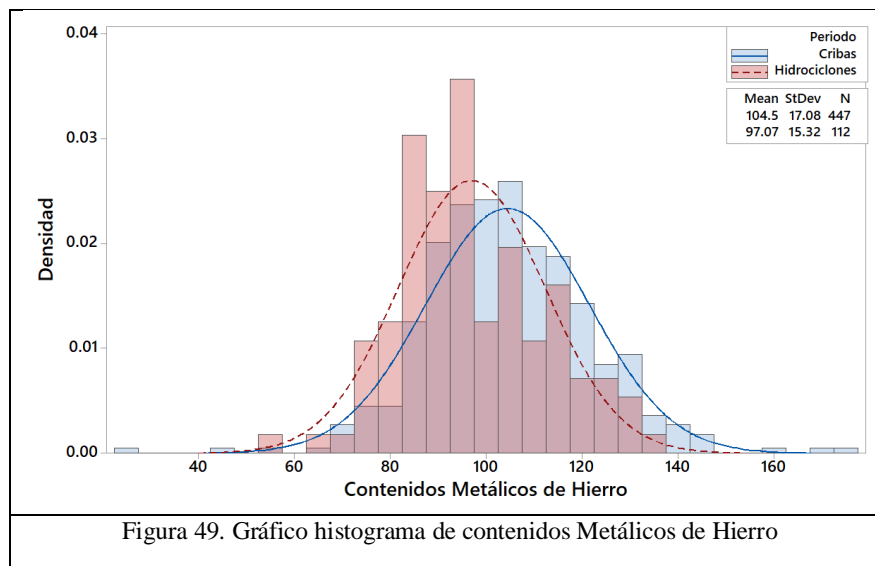
Periodo	N	Media	Desviación Estándar (StDev)	Error estándar
Cribas	447	104.5	17.1	0.81
Hidrociclones	112	97.1	15.3	1.4

Diferencia	$= \mu (1) - \mu (2)$		
Estimación por diferencia:	7.44		
95% CI por Diferencia:	(4.17, 10.72)		
T-Prueba de Diferencia = 0 (vs $\neq$ ):	T-Valor = 4.49	P-Valor = 0.000	DF = 186

La Figura 48 muestra la gráfica de cajas en donde se observa la diferencia en ambos periodos, muestra más variabilidad que el periodo 2 que la operación con hidrociclones.



La Figura 49 muestra el histograma de los contenidos metálicos de hierro en ambos periodos, donde la desviación estándar es mayor con cribas.



### 4.3.5 Contenidos Metálicos de Cobre

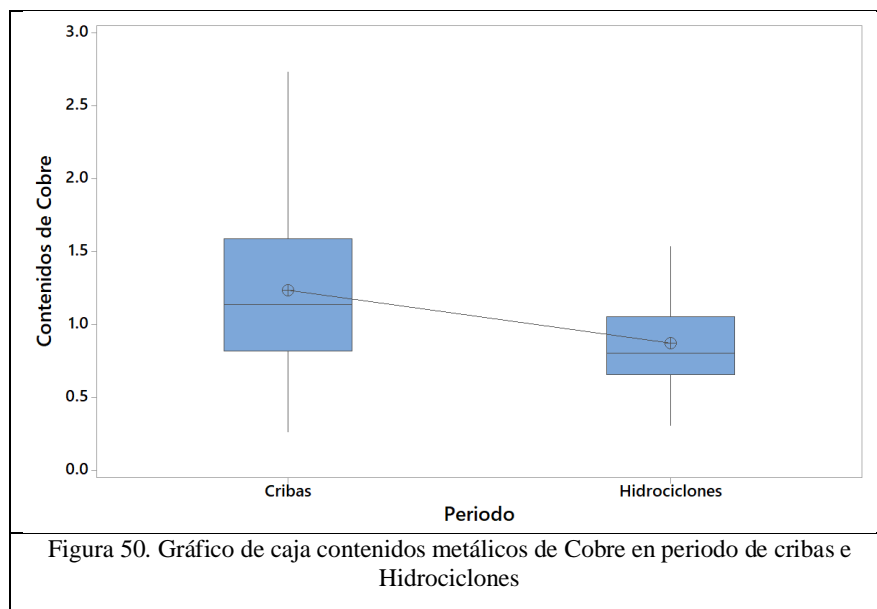
La Tabla 18 muestra que el resultado estadístico de los contenidos metálicos de Cobre por medio de la prueba de T-student indica que la media con cribas es de 1.239 y con hidrociclones la media es 0.874 por lo que estadísticamente P-Valor es menor a 0.05 por lo que estadísticamente concluimos que las medias son diferentes.

Tabla 18. Prueba T e Índice de confianza de dos muestras: Contenidos metálicos de Cobre en dos periodos con cribas e hidrociclones.

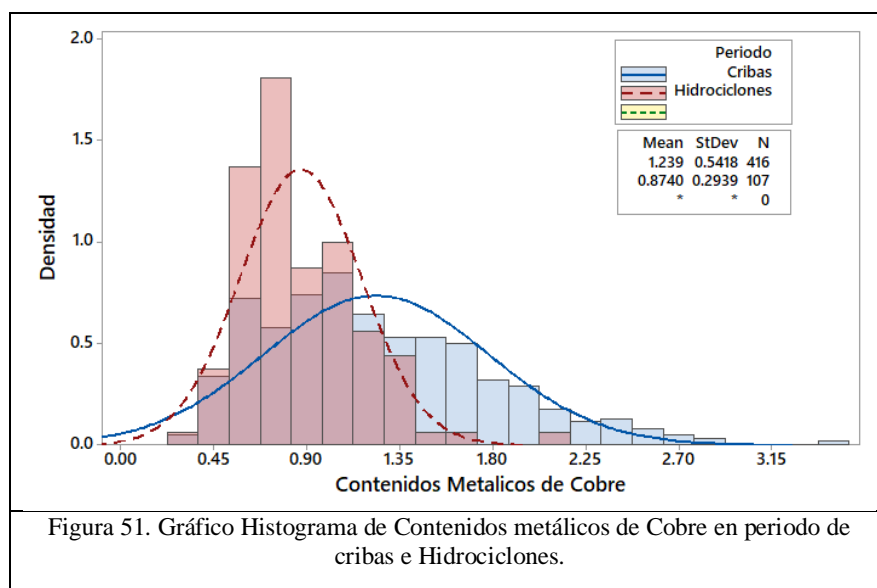
Periodo	N	Media	Desviación Estándar (StDev)	Error estándar
Cribas	416	1.239	0.542	0.027
Hidrociclones	107	0.874	0.294	0.028

Diferencia	= $\mu (1) - \mu (2)$		
Estimación por diferencia:	0.3649		
95% CI por Diferencia:	(0.2581, 0.4717)		
T-Prueba de Diferencia = 0 (vs $\neq$ ):	T-Valor = 6.71	P-Valor = 0.000	DF = 521

La Figura 50 muestra la gráfica de cajas en donde se observa la diferencia en ambos periodos; y en el periodo uno con cribas, muestra más variabilidad que el periodo 1 que la operación con hidrociclones.



La Figura 51 muestra el histograma de los contenidos metálicos de cobre en ambos periodos, donde la desviación estándar es mayor con cribas.



## Resumen

La Tabla 19 muestra el resultado de las pruebas T a los contenidos metálicos de interés, donde se identifica que las medias aritméticas de los contenidos metálicos de los periodos con cribas e hidrociclones y el resultado de P-Valor menor a 0.05 donde se concluye que son diferentes las medias en los diferentes periodos de clasificación.

Tabla 19 Resumen de las pruebas para los contenidos metálicos.

Contenidos Metálicos	Media Periodo cribas	Media Periodo Hidrociclones	P-Valor
Plata (Ag)	510	561	0.024
Plomo (Pb)	19.15	12.44	0.000
Zinc (Zn)	36.4	22.32	0.000
Hierro (Fe)	104.5	97.1	0.000
Cobre (Cu)	1.251	0.896	0.000

Puntos importantes:

La media de los contenidos metálicos en los periodos con cribas e hidrociclones son diferentes. De manera que el equipo de clasificación operó con diferentes rangos de leyes de cabeza.

La variabilidad de la composición de los elementos metálicos puede ser debida a la cantidad de muestras del periodo usado con cribas las cuales son mayores 4 a 1 por lo que tiene un espectro mayor.

A continuación, se describirá la siguiente evaluación donde se evaluará estadísticamente las intensidades de los elementos Plata, Plata Background, Sólidos, Plomo, Zinc y Hierro del periodo con Cribas e Hidrociclones.

#### 4.4 Evaluación de Intensidades en el proceso en línea

En las evaluaciones 4.2 y 4.3 se revisaron la parte metalúrgica del proceso, donde se analizó estadísticamente el tamaño de partícula P80, Tonelaje alimentado y contenidos metálicos de ambos periodos. Donde concluimos que el tamaño de partícula P80 y contenidos metálicos son estadísticamente diferentes.

La figura 52 nos muestra en esta sección nos encontramos color verde que el proceso está en línea donde la unidad minera cuenta con dos equipos de clasificación uno con Cribas e Hidrociclones, se evaluará las intensidades de los elementos Plata, Plomo Zinc Hierro y Sólidos, del turno en los periodos en los que se utilizaron los hidrociclones y las cribas.

El análisis de elementos por longitud de onda (WD) del equipo Courier, cuenta con 6 canales detectores, los cuales son para medir Plomo (PbWD), Zinc (ZnWD) Hierro (FeWD), Sólidos (Sc), Plata (AgWD) y Plata Background (AgBg). Se realizó un análisis estadístico mediante el uso de T para determinar si las medias eran iguales o distintas en el periodo de hidrociclones y de cribas.

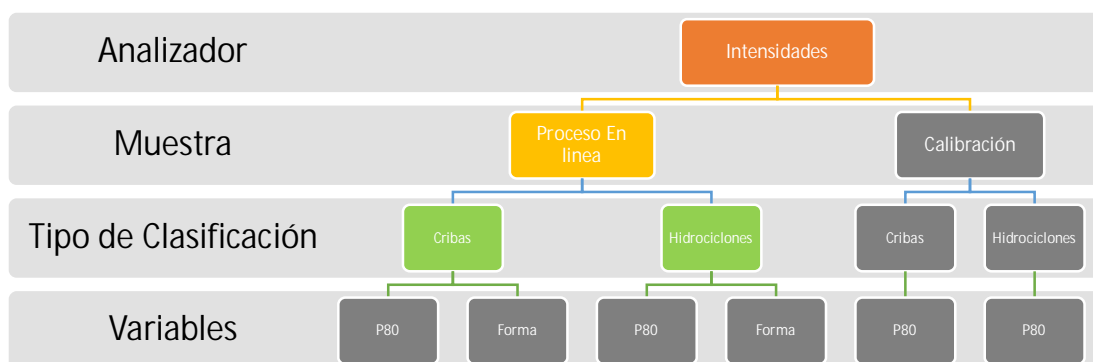


Figura 52 Procedimiento empleado para realizar pruebas estadísticas de las intensidades en los periodos de clasificación.

##### 4.4.1 Intensidades de Plata

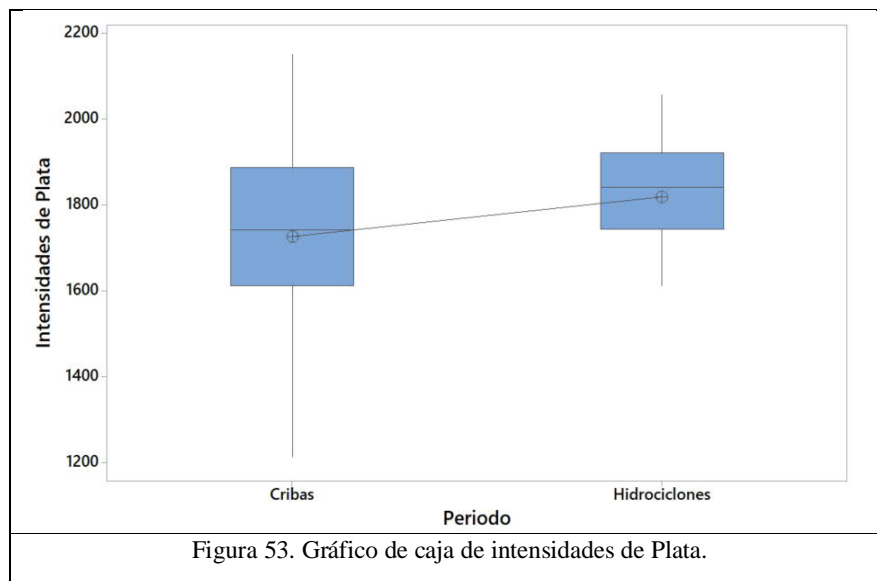
La Tabla 20 muestra que el resultado estadístico de las intensidades de Plata por medio de la prueba de T-student, indica que la media con cribas es de 1764 y con hidrociclones la media es 1823 por lo que estadísticamente P-Valor es menor a 0.05 por lo que estadísticamente concluimos que las medias son diferentes.

Tabla 20 Prueba T e Índice de confianza de dos muestras: Intensidades de Plata (Ag) en dos periodos con cribas e hidrociclones.

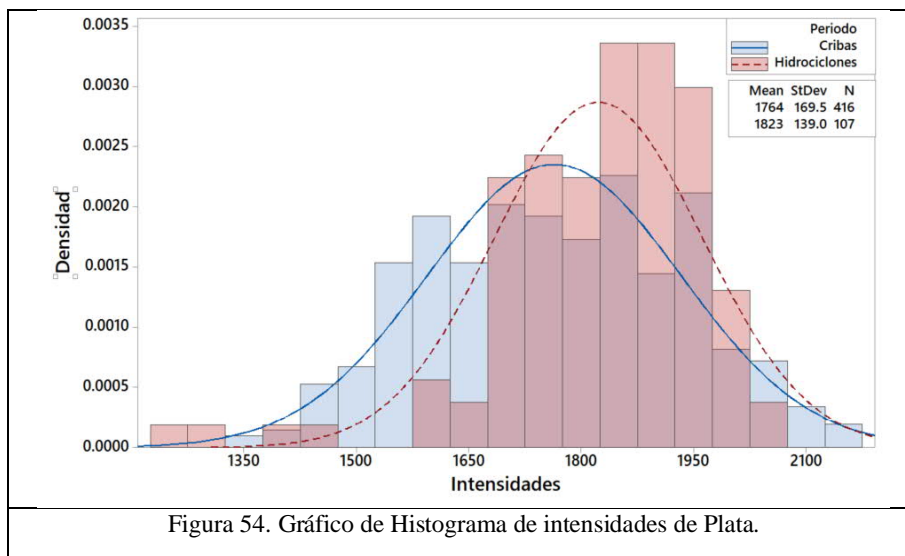
Periodo	N	Media	Desviación Estándar (StDev)	Error estándar
Cribas	416	1764	170	8.3
Hidrociclones	107	1823	139	13
Diferencia	$= \mu (1) - \mu (2)$			
Estimación por diferencia:	-59			
95% CI por Diferencia:	(-93.9, -24.2)			
T-Prueba de Diferencia = 0 (vs $\neq$ ):	T-Valor = -3.32	P-Valor = 0.000	DF = 521	



La Figura 53 muestra la gráfica de cajas en donde se observa la diferencia en ambos periodos el periodo uno con cribas, muestra más variabilidad que la operación con hidrociclones.



La Figura 54 muestra el histograma de las intensidades de plata en ambos periodos, donde la desviación estándar es mayor con cribas.



#### 4.4.2 Intensidades de Plomo

La Tabla 21 muestra que el resultado estadístico de las intensidades de Plomo por medio de la prueba de T, indica que la media con cribas es de 1556 y con hidrociclones la media es

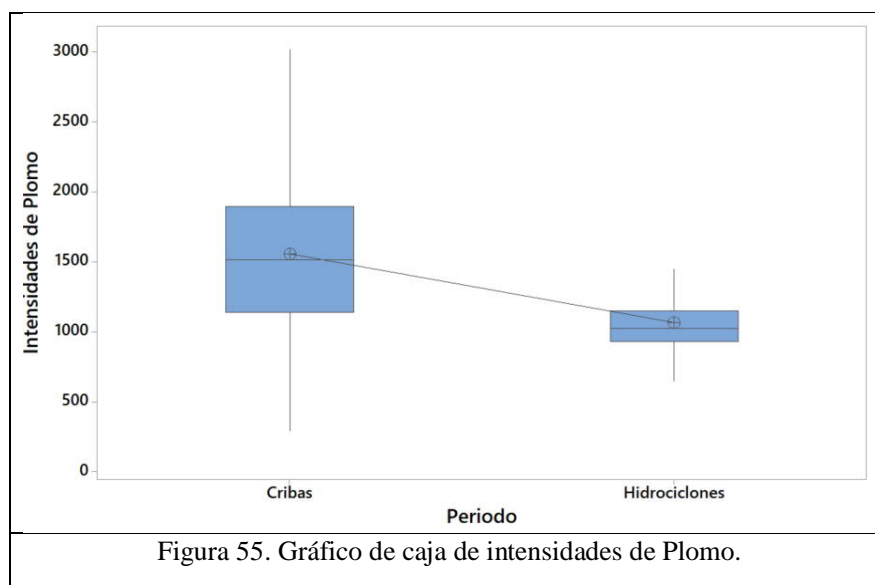
1070 por lo que estadísticamente P-Valor es menor a 0.05 por lo que estadísticamente concluimos que las medias son diferentes.

Tabla 21 Prueba T e Índice de confianza de dos muestras: Intensidades de Plomo en dos periodos con cribas e hidrociclones.

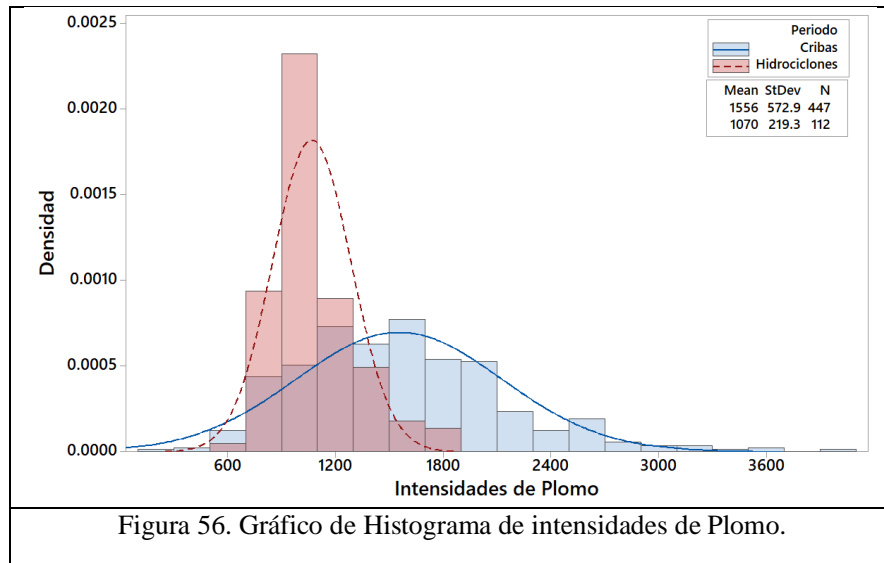
Periodo	N	Media	Desviación Estándar (StDev)	Error estándar
Cribas	447	1556	573	27
Hidrociclones	112	1070	219	21

Diferencia	$= \mu (1) - \mu (2)$		
Estimación por diferencia:	486.0		
95% CI por Diferencia:	(419.0, 553.1)		
T-Prueba de Diferencia = 0 (vs $\neq$ ):	T-Valor = 14.25	P-Valor = 0.000	DF = 471

La Figura 55 muestra la gráfica de cajas en donde se observa la diferencia en ambos periodos, el periodo uno con cribas muestra más variabilidad que la operación con hidrociclones.



La Figura 56 muestra el histograma de las intensidades de plomo en ambos periodos, donde la desviación estándar es mayor con cribas.



### 4.4.3 Intensidades de Zinc

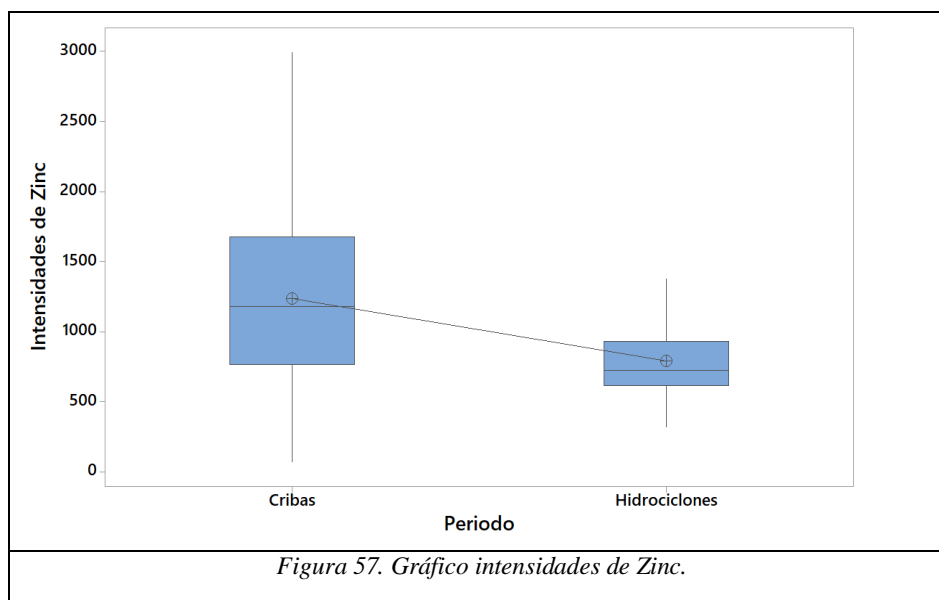
La Tabla 22 muestra que el resultado estadístico de las intensidades de Zinc por medio de la prueba de T indica que la media con cribas es de 1234 y con hidrociclones la media es 791 por lo que estadísticamente P-Valor es menor a 0.05 por lo que estadísticamente concluimos que las medias son diferentes.

Tabla 22. Prueba T e Índice de confianza de dos muestras: Intensidades de Zinc en dos periodos con cribas e hidrociclones.

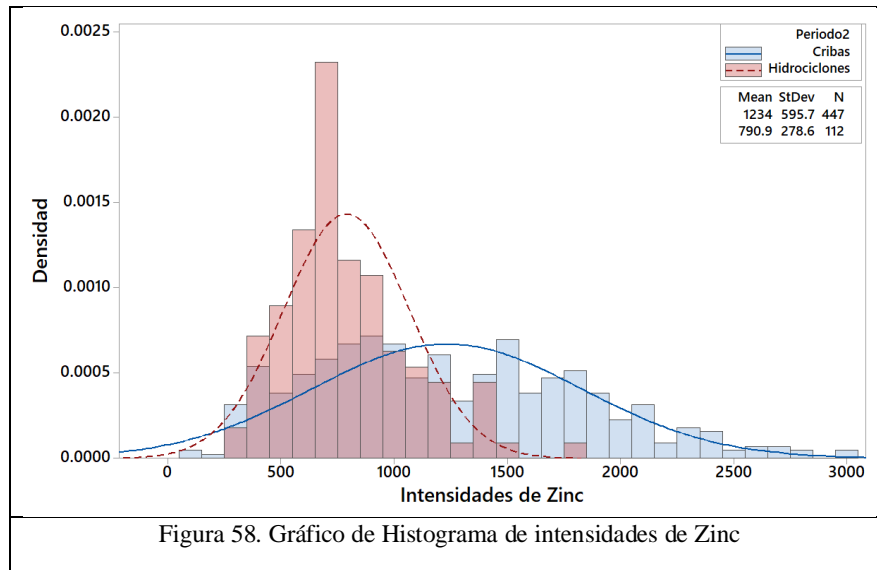
Periodo	N	Media	Desviación Estándar (StDev)	Error estándar
Cribas	447	1234	596	28
Hidrociclones	112	791	279	26

Diferencia	$= \mu (1) - \mu (2)$		
Estimación por diferencia:	442.9		
95% CI por Diferencia:	(367.1, 518.7)		
T-Prueba de Diferencia = 0 (vs $\neq$ ):	T-Valor = 11.49	P-Valor = 0.000	DF = 385

La Figura 57 muestra la gráfica de cajas en donde se observa la diferencia en ambos periodos, el periodo uno con cribas muestra más variabilidad que la operación con hidrociclones.



La Figura 58 muestra el histograma de las intensidades de zinc en ambos periodos, donde la desviación estándar es mayor con cribas.



#### 4.4.4 Intensidades de Hierro

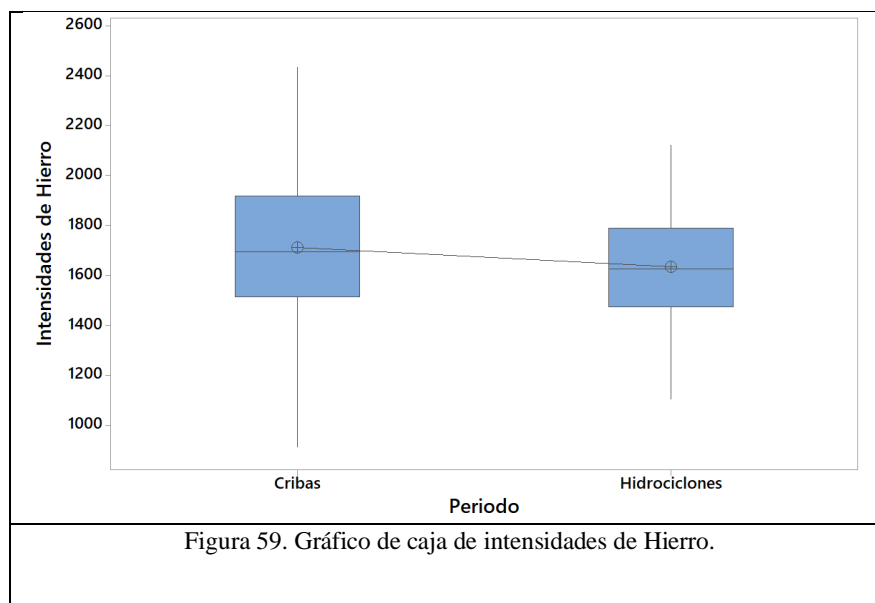
La Tabla 23 muestra que el resultado estadístico de las intensidades de Hierro por medio de la prueba de T indica que la media con cribas es de 1712 y con hidrociclones la media es 1634 por lo que estadísticamente P-Valor es igual a 0.05 por lo que estadísticamente concluimos que las medias son diferentes.

Tabla 23 Prueba T e Índice de confianza de dos muestras: Intensidades de Hierro en dos periodos con cribas e hidrociclones.

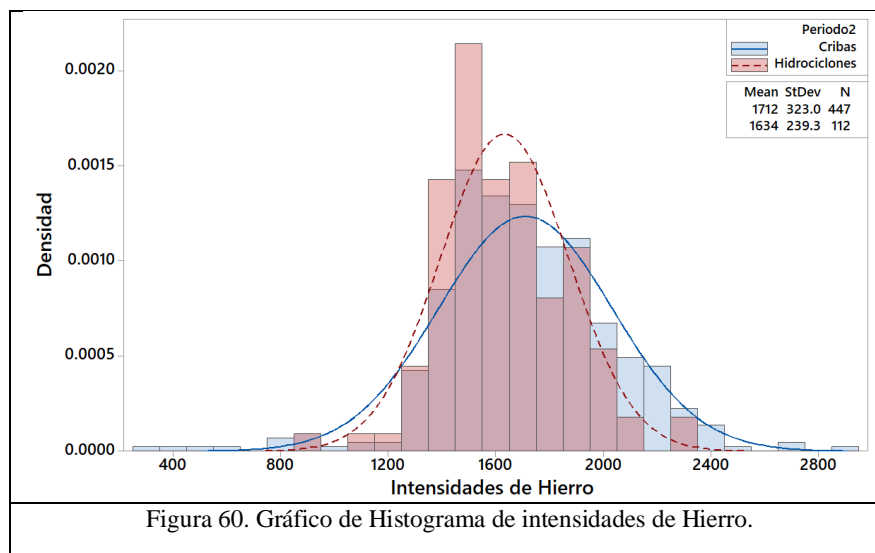
<u>Periodo</u>	<u>N</u>	<u>Media</u>	<u>Desviación Estándar (StDev)</u>	<u>Error estándar</u>
Cribas	447	1712	323	15
Hidrociclones	112	1634	239	23

Diferencia	= $\mu (1) - \mu (2)$		
Estimación por diferencia:	77.8		
95% CI por Diferencia:	(24.1, 131.6)		
T-Prueba de Diferencia = 0 (vs $\neq$ ):	T-Valor = 2.85	P-Valor = 0.005	DF = 223

La Figura 59 muestra la gráfica de cajas en donde se observa la diferencia en ambos periodos, el periodo uno con cribas muestra más variabilidad que la operación con hidrociclones.



La Figura 60 muestra el histograma de las intensidades de hierro en ambos periodos, donde la desviación estándar es mayor con cribas.



#### 4.4.5 Intensidades de Sólidos

La Tabla 24 muestra que el resultado estadístico de las intensidades de sólidos por medio de la prueba de T, indica que la media con cribas es de 24,065 y con hidrociclones la media es 25,263 por lo que estadísticamente P-Valor es menor a 0.05 por lo que estadísticamente concluimos que las medias son diferentes.

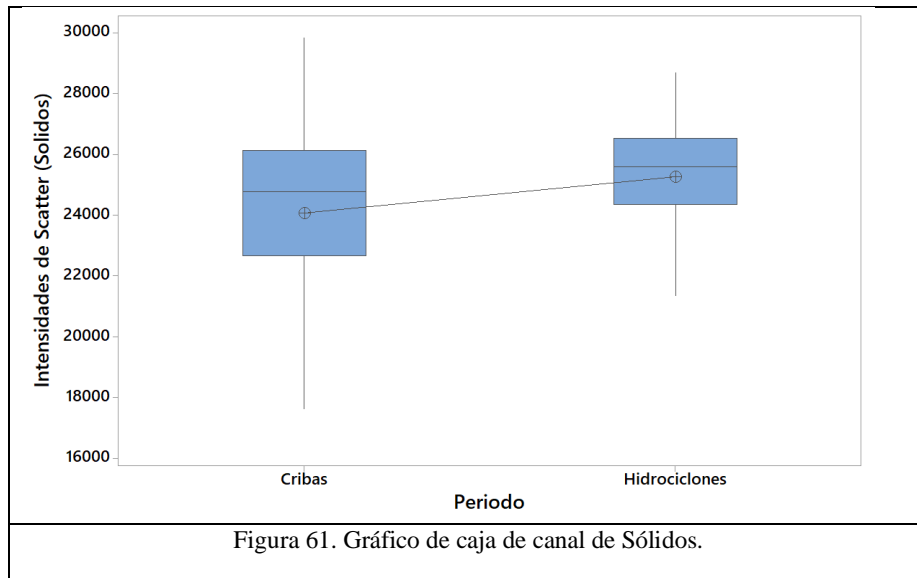
Tabla 24. Prueba T e Índice de confianza de dos muestras: Intensidades del canal de sólidos (Scatter) en dos periodos con cribas e hidrociclones.

Periodo	N	Media	Desviación Estándar (StDev)	Error estándar
Cribas	447	24,065	3197	151
Hidrociclones	112	25,263	2275	215

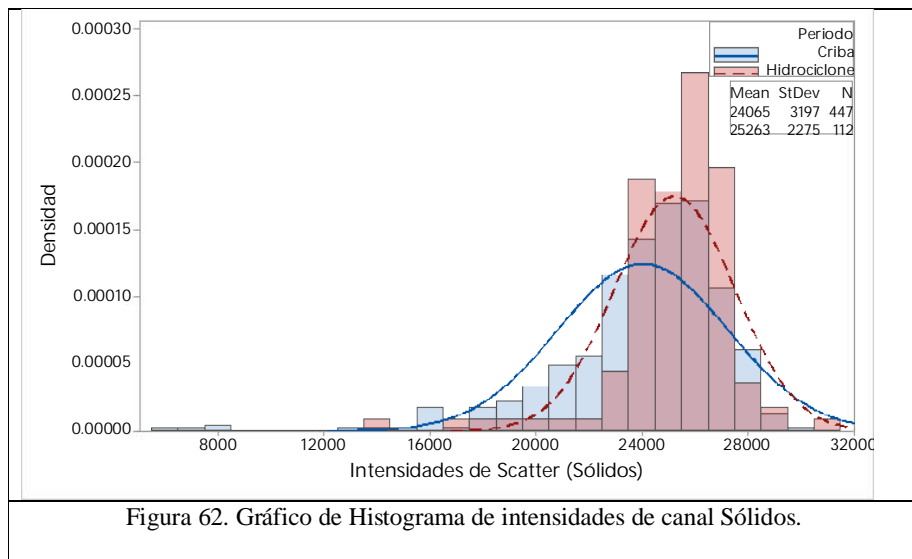
  

Diferencia	$= \mu (1) - \mu (2)$		
Estimación por diferencia:	-1198		
95% CI por Diferencia:	(-1716, -680)		
T-Prueba de Diferencia = 0 (vs $\neq$ ):	T-Valor = -4.56	P-Valor = 0.000	DF = 233

La Figura 61 muestra la gráfica de cajas en donde se observa la diferencia en ambos periodos, en el periodo uno con cribas muestra más variabilidad que la operación con hidrociclones.



La Figura 62 muestra el histograma de las intensidades de sólidos en ambos periodos, donde la desviación estándar es mayor con cribas.





#### 4.4.6 Intensidades de Plata Background

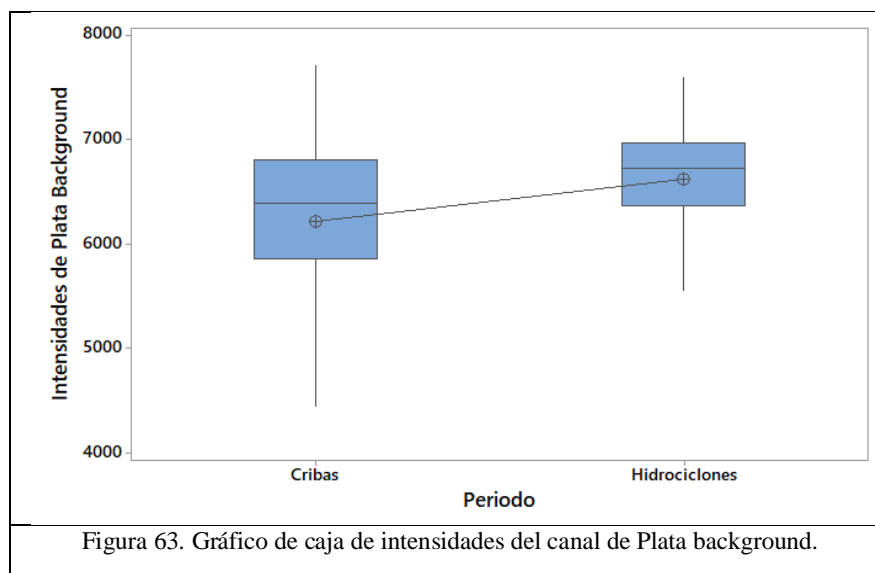
La Tabla 25 muestra que el resultado estadístico de las intensidades de Plata Background por medio de la prueba de T-student, indica que la media con cribas es de 6217 y con hidrociclones la media es 6621 por lo que estadísticamente P-Valor es menor a 0.05 por lo que estadísticamente concluimos que las medias son diferentes.

*Tabla 25 Prueba T e Índice de confianza de dos muestras: Intensidades del Canal de Plata Background Ag Bg, en los Periodos con cribas y con hidrociclones.*

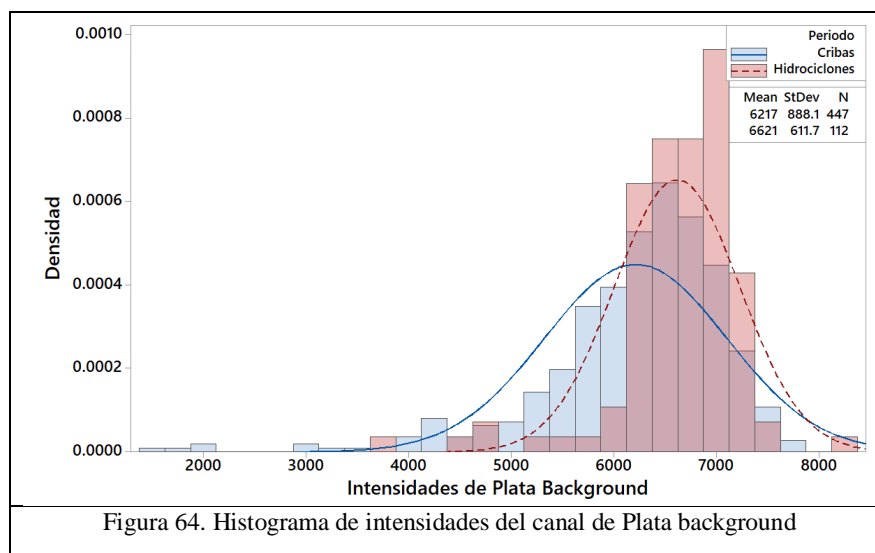
Periodo	N	Media	Desviación Estándar (StDev)	Error estándar
Cribas	447	6217	888	42
Hidrociclones	112	6621	612	58

Diferencia	$= \mu (1) - \mu (2)$		
Estimación por diferencia :	-404.0		
95% CI por Diferencia:	(-544.7, -263.2)		
T-Prueba de Diferencia = 0 (vs $\neq$ ):	T-Valor = -5.65	P-Valor = 0.000	DF = 242

La Figura 63 muestra la gráfica de cajas en donde se observa la diferencia en ambos periodos, el periodo uno con cribas muestra más variabilidad que la operación con cribas.



La Figura 64 muestra el histograma de las intensidades de plomo en ambos periodos, donde la desviación estándar es mayor con cribas.



## Resumen

La Tabla 26 muestra el resumen de las medias de las intensidades de los elementos en los periodos con Cribas vs Hidrociclones y el resultado de la comparación de medias con la prueba estadística T para las intensidades de los elementos, el valor de P-Valor es menor a 0.05 por lo que concluimos que estadísticamente las medias de ambos periodos son diferentes.

Tabla 26. Resultados de las pruebas T para las intensidades.

Intensidades	Media Periodo Cribas	Media Periodo Hidrociclones	P-Valor
Plata (Ag)	1728	1820	0.00
Plomo (Pb)	1556	1070	0.00
Zinc (Zn)	1234	791	0.00
Hierro (Fe)	1712	1634	0.005
Sólidos (Sol)	24065	25263	0.000
Plata Background (Ag Bg)	6217	6621	0.000

Puntos importantes:

El resultado de las pruebas estadísticas T nos indican que las medias de las intensidades de los periodos con cribas e hidrociclones son estadísticamente diferentes, por lo que el analizador Courier cambia con el tipo de clasificación.

A continuación, se describirá la siguiente evaluación donde se evaluará estadísticamente los contenidos metálicos vs el tamaño de partícula P80 del periodo con Cribas e Hidrociclones.

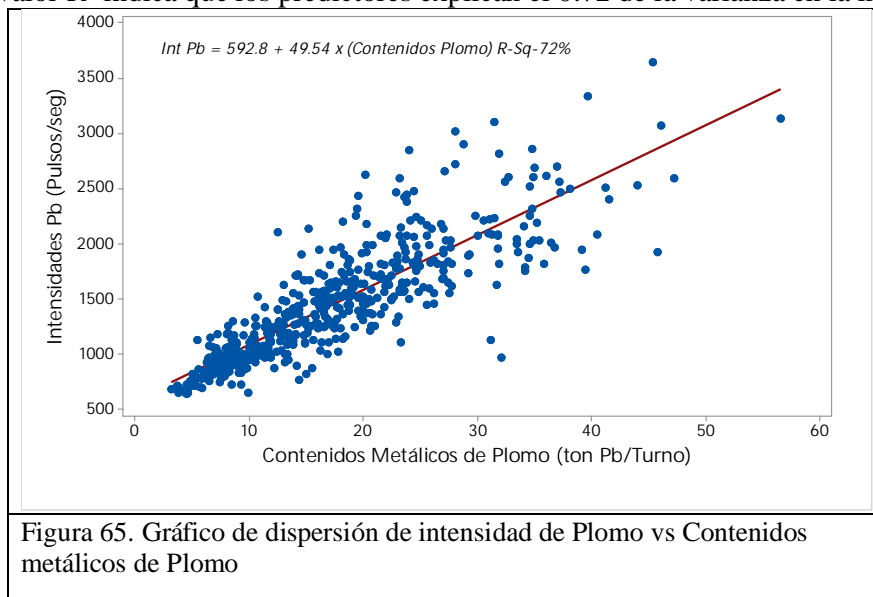
#### 4.5 Evaluación de contenidos metálicos vs tamaño de partícula P80

En la sección anterior evaluamos las intensidades de cada periodo con Cribas e Hidrociclones, como resultado es que las intensidades de ambos periodos son diferentes. En esta sección se evaluó el efecto del tamaño de partícula en las intensidades de los elementos Plata, Plomo Zinc Hierro y Sólidos en los periodos mencionados.

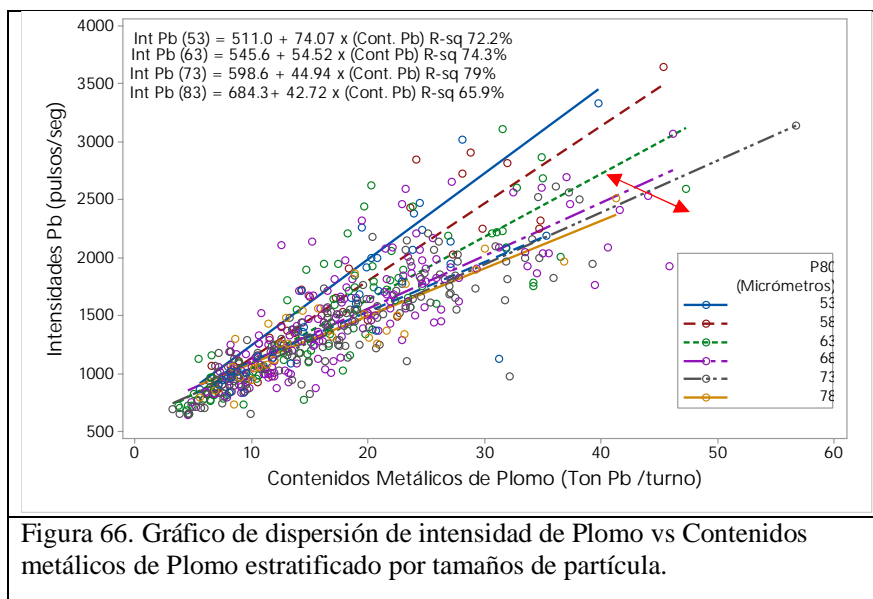
Se determinó la influencia que tienen los contenidos metálicos y el tamaño de partícula P80 con las intensidades de Plomo, Zinc, Hierro, Plata y Plata Background.

##### 4.5.1 Contenidos metálicos de Plomo vs Intensidades

La Figura 65 muestra la gráfica de dispersión correspondiente a las intensidades del canal de Plomo vs los Contenidos metálicos de plomo, se observa que conforme se incrementan los contenidos metálicos de plomo, las intensidades del canal de Plomo aumentan; en este caso, el valor  $R^2$  indica que los predictores explican el 0.72 de la varianza en la intensidad.



Para determinar el efecto del tamaño de partícula P80 se estratificó por grupos, de acuerdo con el rango de tamaño de partícula P80, la Figura 66 muestra las diferentes líneas de regresión.



La ecuación de la recta nos indica un  $R^2 = 0.72$  de correlación, a partir de la Ecuación 12:

$$\text{Int Pb} = 592.8 + 49.54 x (\text{Contenidos Pb}) \quad R^2 = 0.72 \quad \text{Ecuación 14}$$

Las ecuaciones lineales estratificando el tamaño de partícula P80 de 53, 58, 63, 68, 73, 78, 83 micrómetros se muestran donde la pendiente es mayor cuando la galena tiene un menor tamaño de partícula.

$$\text{Int Pb (53}\mu) = 511.0 + 74.07 x (\text{Contenidos Pb}) \quad R^2 = 0.72 \quad \text{Ecuación 15}$$

$$\text{Int Pb (58}\mu) = 471.2 + 66.62 x (\text{Contenidos Pb}) \quad R^2 = 0.874 \quad \text{Ecuación 16}$$

$$\text{Int Pb (63}\mu) = 545.6 + 54.52 x (\text{Contenidos Pb}) \quad R^2 = 0.743 \quad \text{Ecuación 17}$$

$$\text{Int Pb (68}\mu) = 650.9 + 45.67 x (\text{Contenidos Pb}) \quad R^2 = 0.701 \quad \text{Ecuación 18}$$

$$\text{Int Pb (73}\mu) = 598.6 + 44.94 x (\text{Contenidos Pb}) \quad R^2 = 0.790 \quad \text{Ecuación 19}$$

$$\text{Int Pb (78}\mu) = 680.3 + 40.97 x (\text{Contenidos Pb}) \quad R^2 = 0.787 \quad \text{Ecuación 20}$$

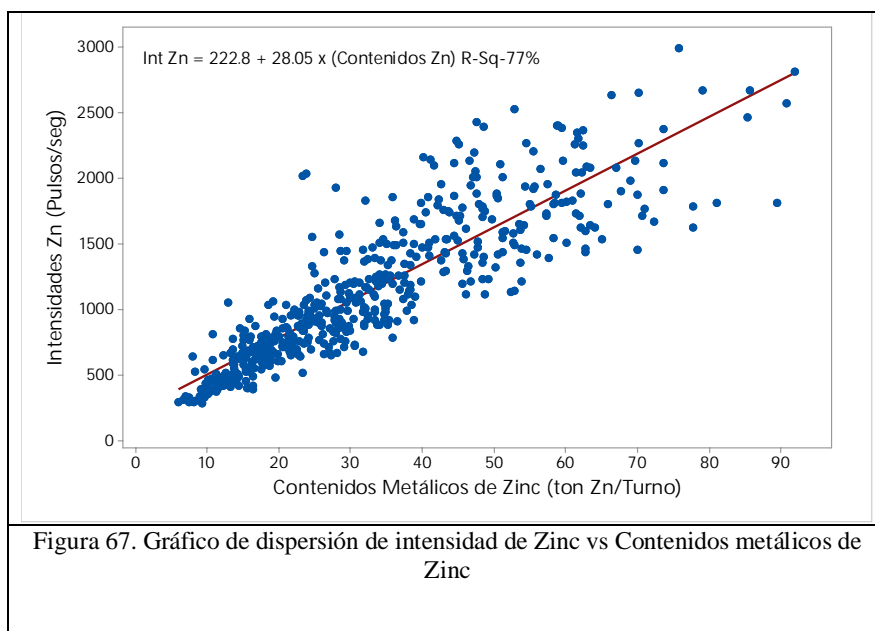
$$\text{Int Pb (83}\mu) = 684.3 + 42.72 x (\text{Contenidos Pb}) \quad R^2 = 0.659 \quad \text{Ecuación 21}$$

### Puntos importantes

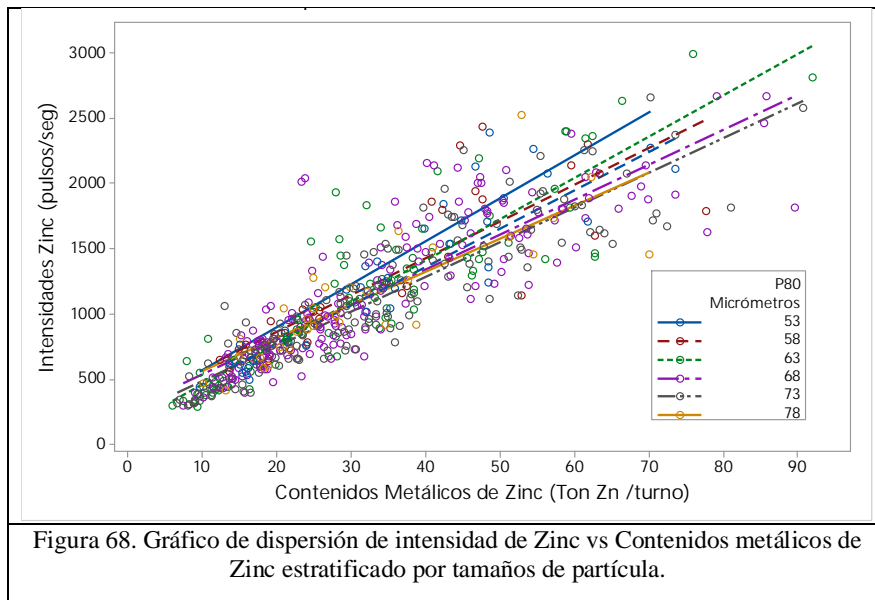
El ensaye químico del plomo ya estratificado por tamaño de partícula P80 y una vez graficado con la intensidad del canal de plomo, podemos concluir que las partículas gruesas disminuyen la pendiente de la ecuación de regresión.

#### 4.5.2 Contenidos metálicos de Zinc vs Intensidades

La Figura 67 muestra el gráfico de dispersión correspondiente a las intensidades del canal de Zinc vs los Contenidos metálicos de zinc, se observa que conforme se incrementan los contenidos metálicos de Zinc, las intensidades del canal de Zinc aumentan; en este caso, el valor  $R^2$  indica que los predictores explican el 0.77 de la varianza de intensidad.



Para determinar el efecto del tamaño de partícula P80 se estratificó por grupos, de acuerdo con el rango de tamaño de partícula P80, la Figura 68 muestra las diferentes líneas de regresión



La ecuación de la recta nos indica un  $R^2 = 0.77$  de correlación, a partir de la Ecuación 20

$$\text{Int Zn} = 222.8 + 28.05 x (\text{Contenidos Zn}) \quad R^2 = 0.77 \quad \text{Ecuación 22}$$

Las ecuaciones lineales estratificando el tamaño de partícula P80 de 53, 58, 63, 68, 73, 78, 83 micrómetros se muestran donde la pendiente es mayor cuando la esfalerita tiene un menor tamaño de partícula.

$$\text{Int Zn (53}\mu) = 228 + 33.08 x (\text{Contenidos Zn}) \quad R^2 = 0.825 \quad \text{Ecuación 23}$$

$$\text{Int Zn (58}\mu) = 302 + 28.09 x (\text{Contenidos Zn}) \quad R^2 = 0.7109 \quad \text{Ecuación 24}$$

$$\text{Int Zn (63}\mu) = 137.4 + 31.80 x (\text{Contenidos Zn}) \quad R^2 = 0.811 \quad \text{Ecuación 25}$$

$$\text{Int Zn (68}\mu) = 261.4 + 26.85 x (\text{Contenidos Zn}) \quad R^2 = 0.749 \quad \text{Ecuación 26}$$

$$\text{Int Zn (73}\mu) = 214.8 + 26.68 x (\text{Contenidos Zn}) \quad R^2 = 0.886 \quad \text{Ecuación 27}$$

$$\text{Int Zn (78}\mu) = 306.9 + 25.43 x (\text{Contenidos Zn}) \quad R^2 = 0.691 \quad \text{Ecuación 28}$$

$$\text{Int Zn (83}\mu) = 187.4 + 29.31 x (\text{Contenidos Zn}) \quad R^2 = 0.82 \quad \text{Ecuación 29}$$

### Puntos importantes

El ensayo químico del Zinc se estratificó por tamaño de partícula P80 y una vez graficado con la intensidad del canal de Zinc, podemos concluir que las partículas gruesas disminuyen la pendiente de la ecuación de regresión.

### 4.5.3 Contenidos metálicos de Hierro vs Intensidades

La Figura 69 muestra el gráfico de dispersión correspondiente a las intensidades del canal de Hierro vs los Contenidos metálicos de hierro, se observa que conforme se incrementan los contenidos metálicos de Hierro, las intensidades del canal de Hierro aumentan; en este caso, el valor  $R^2$  indica que los predictores explican el 0.37 de la varianza de intensidad.

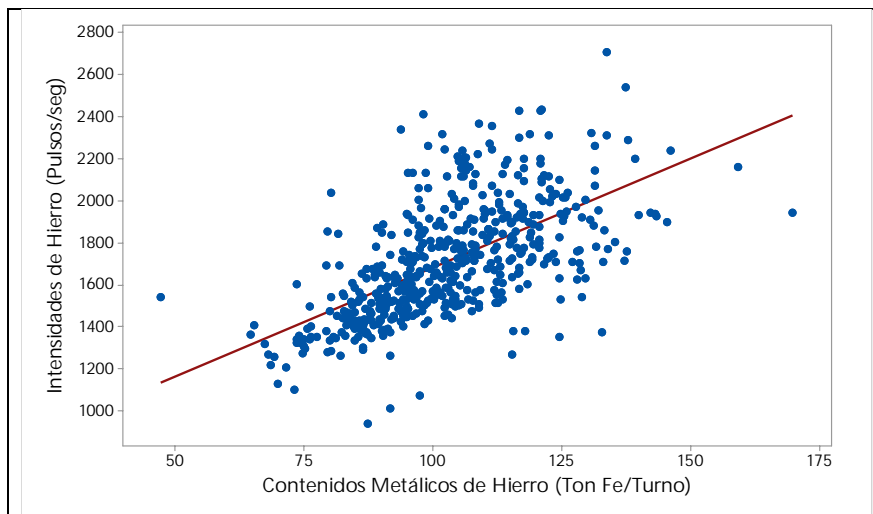


Figura 69 Gráfico de dispersión de intensidad de Hierro vs Contenidos metálicos de Hierro.

Para determinar el efecto del tamaño de partícula P80 se estratificó por grupos, de acuerdo con el rango de tamaño de partícula P80, la Figura 70 muestra las diferentes líneas de regresión.

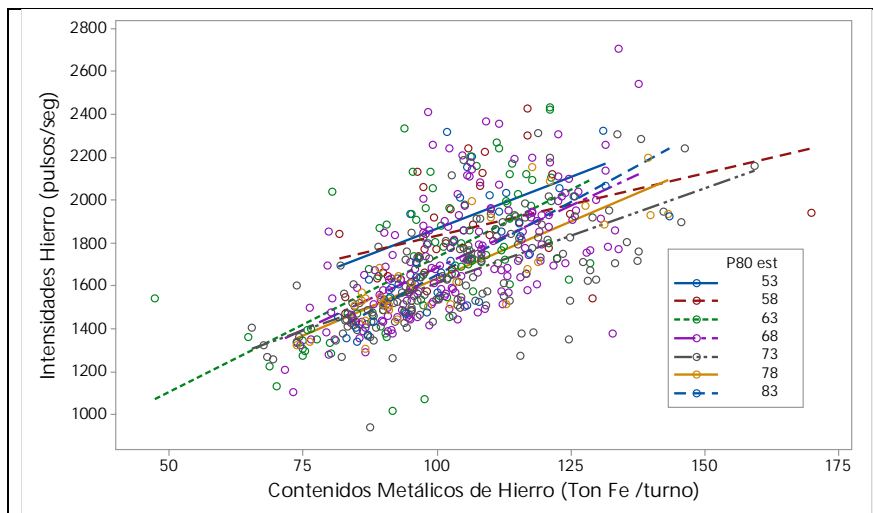


Figura 70 Gráfico de dispersión de intensidad de Hierro vs Contenidos metálicos de Hierro estratificado por tamaño partícula.

La ecuación de la recta nos indica un  $R^2 = 0.376$  de correlación, a partir de la Ecuación 30.

$$\text{Int Fe} = 646 + 10.34 x (\text{Contenidos Hierro}) \quad R^2 = 0.376 \quad \text{Ecuación 30}$$

Las ecuaciones lineales estratificando el tamaño de partícula P80 de 53, 58, 63, 68, 73, 78, 83 micrómetros se muestran donde la pendiente es mayor cuando la pirita tiene mayor correlación con tamaño de partícula gruesos.

$$\text{Int Fe (53}\mu) = 904.9 + 9.65 x (\text{Cont. Fe}) \quad R^2 = 0.235 \quad \text{Ecuación 31}$$

$$\text{Int Fe (58}\mu) = 1250 + 5.83 x (\text{Cont. Fe}) \quad R^2 = 0.157 \quad \text{Ecuación 32}$$

$$\text{Int Fe (63}\mu) = 472.5 + 12.63 x (\text{Cont Fe}) \quad R^2 = 0.395 \quad \text{Ecuación 33}$$

$$\text{Int Fe (68}\mu) = 522.6 + 11.63 x (\text{Cont. Fe}) \quad R^2 = 0.386 \quad \text{Ecuación 34}$$

$$\text{Int Fe (73}\mu) = 722.5 + 8.878 x (\text{Cont. Fe}) \quad R^2 = 0.443 \quad \text{Ecuación 35}$$

$$\text{Int Fe (78}\mu) = 574 + 10.61 x (\text{Cont. Fe}) \quad R^2 = 0.683 \quad \text{Ecuación 36}$$

$$\text{Int Fe (83}\mu) = 287 + 13.63 x (\text{Cont. Fe}) \quad R^2 = 0.679 \quad \text{Ecuación 37}$$

### Puntos importantes

El ensayo químico del Hierro se estratifico por tamaño de partícula P80 y una vez graficado con la intensidad del canal de Hierro, podemos concluir que las partículas gruesas y partículas finas las pendientes son paralelas en la ecuación de regresión.



#### 4.5.4 Contenidos metálicos de Plata vs Intensidades

La Figura 71 muestra el gráfico de dispersión correspondiente a las intensidades del canal de Plata vs los Contenidos metálicos de plata, se observa que conforme se incrementan los contenidos metálicos de Plata, las intensidades del canal de Plata aumentan; en este caso, el valor  $R^2$  indica que los predictores explican el 0.006 de la varianza de intensidad.

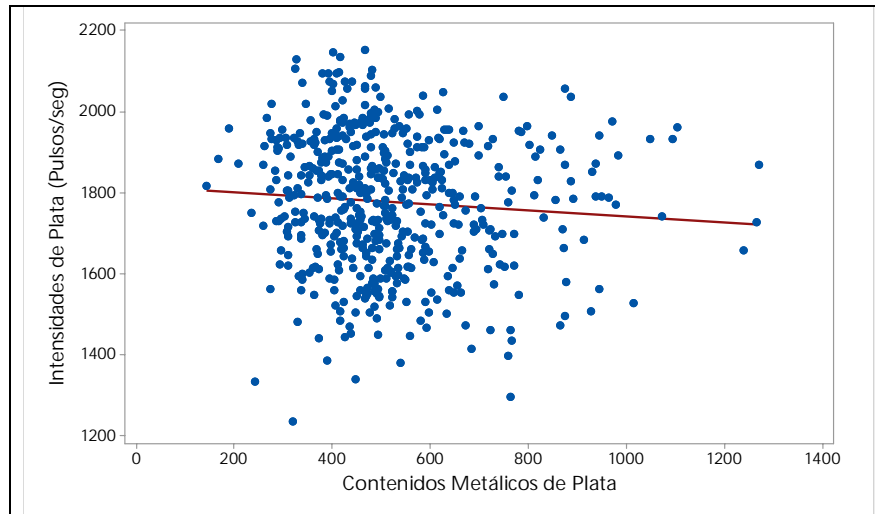


Figura 71. Gráfico de dispersión de intensidad de Plata vs Contenidos metálicos de Plata.

Para determinar el efecto del tamaño de partícula P80 se estratificó por grupos, de acuerdo con el rango de tamaño de partícula P80, la Figura 72 muestra las diferentes líneas de regresión.

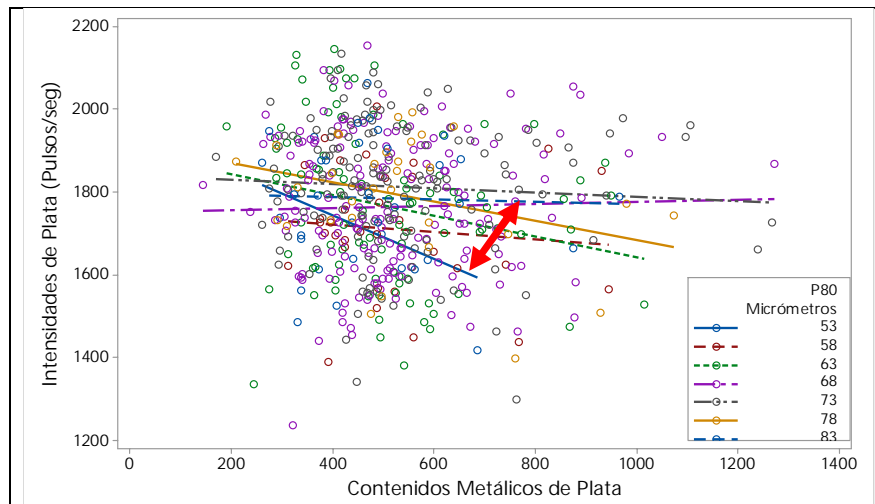


Figura 72. Gráfico de dispersión de intensidad de Plata vs Contenidos metálicos de Plata estratificado por tamaño partícula.

La ecuación de la recta nos indica un  $R^2 = 0.006$  de correlación casi nula, a partir de la Ecuación 38.

$$Int Ag = 1815 - 0.07411 x (Contenidos Plata) R^2 = 0.006 \quad \text{Ecuación 38}$$

Las ecuaciones lineales estratificando el tamaño de partícula P80 de 53, 58, 63, 68, 73, 78, 83 micrómetros se muestran donde la pendiente es mayor cuando la plata tiene mayor correlación con tamaño de partícula fina.

$$Int Ag (53\mu) = 1951 - 0.5249 x (Contenidos Plata) R^2 = 0.13 \quad \text{Ecuación 39}$$

$$Int Ag (58\mu) = 1756 - 0.089 x (Contenidos Plata) R^2 = 0.009 \quad \text{Ecuación 40}$$

$$Int Ag (63\mu) = 1893 - 0.252 x (Contenidos Plata) R^2 = 0.05 \quad \text{Ecuación 41}$$

$$Int Ag (68\mu) = 1751 + 0.0251 x (Contenidos Plata) R^2 = 0.001 \quad \text{Ecuación 42}$$

$$Int Ag (73\mu) = 1840 - 0.0531 x (Contenidos Plata) R^2 = 0.004 \quad \text{Ecuación 43}$$

$$Int Ag (78\mu) = 1914 - 0.282 x (Contenidos Plata) R^2 = 0.095 \quad \text{Ecuación 44}$$

$$Int Ag (83\mu) = 1799 - 0.028x (Contenidos Plata) R^2 = 0.001 \quad \text{Ecuación 45}$$

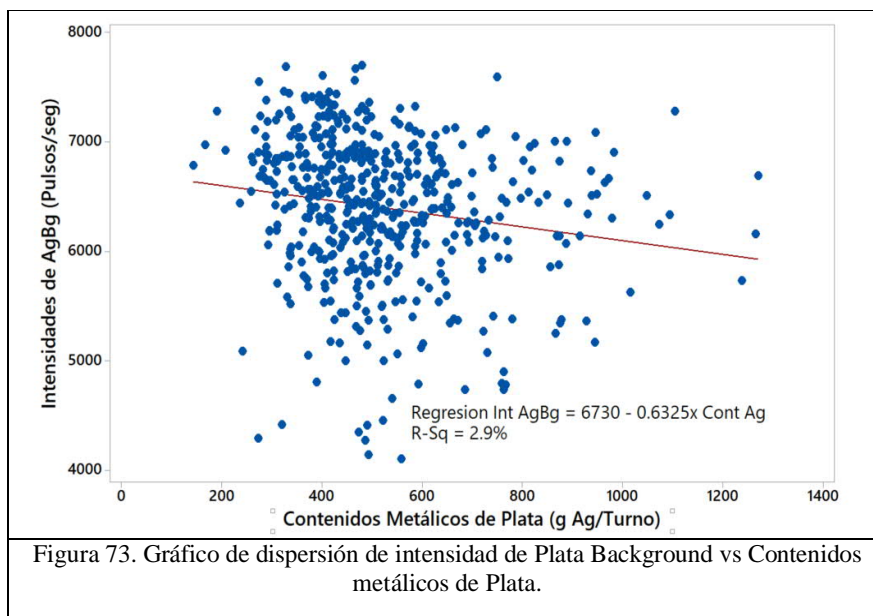
Puntos importantes:

Analizando las ecuaciones de las intensidades estratificadas por tamaño de partícula de la Plata, se muestra que la pendiente de las intensidades es mayor cuando son más finas las partículas.

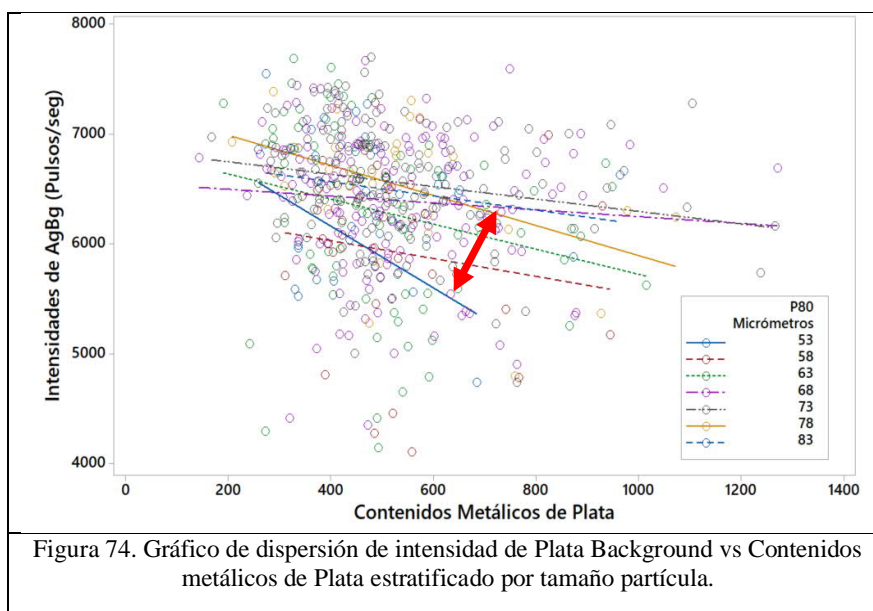
Hay que tomar en cuenta que la plata esta medida en gramos por tonelada y que la cantidad presente en el mineral analizado es menor a los minerales de Plomo y Zinc

#### 4.5.5 Contenidos metálicos de Plata background vs Intensidades de Plata background

La Figura 73 muestra el gráfico de dispersión correspondiente a las intensidades del canal de Plata background vs los Contenidos metálicos de plata, conforme se incrementan los Contenidos metálicos de Plata, las intensidades del canal de Plata background aumentan, en este caso, el valor  $R^2$  indica que los predictores explican el 0.029 de la varianza de intensidad.



Para determinar el efecto del tamaño de partícula P80 se estratificó por grupos, de acuerdo con el rango de tamaño de partícula P80, la Figura 74 muestra las diferentes líneas de regresión.



La ecuación de la recta nos indica un  $R^2 = 0.029$  de correlación, a partir de la Ecuación 46

$$Int\ AgBg = 6730 - 0.6325 x (Contenidos\ Plata) \quad R^2 = 0.029 \quad \text{Ecuación 46}$$

Las ecuaciones lineales estratificando el tamaño de partícula P80 de 53, 58, 63, 68, 73, 78, 83 micrómetros se muestran donde la pendiente es mayor cuando la plata tiene mayor correlación con tamaño de partícula gruesos.

$$Int\ AgBg\ (53\mu) = 904.9 + 9.65 x (Contenidos\ Plata) \quad R^2 = 0.235 \quad \text{Ecuación 47}$$

$$Int\ AgBg\ (58\mu) = 1250 + 5.83 x (Contenidos\ Plata) \quad R^2 = 0.157 \quad \text{Ecuación 48}$$

$$Int\ AgBg\ (63\mu) = 472.5 + 12.63 x (Contenidos\ Plata) \quad R^2 = 0.395 \quad \text{Ecuación 49}$$

$$Int\ AgBg\ (68\mu) = 522.6 + 11.63 x (Contenidos\ Plata) \quad R^2 = 0.386 \quad \text{Ecuación 50}$$

$$Int\ AgBg\ (73\mu) = 722.5 + 8.878 x (Contenidos\ Plata) \quad R^2 = 0.443 \quad \text{Ecuación 51}$$

$$Int\ AgBg\ (78\mu) = 574 + 10.61 x (Contenidos\ Plata) \quad R^2 = 0.683 \quad \text{Ecuación 52}$$

$$Int\ AgBg\ (83\mu) = 287 + 13.63 x (Contenidos\ Plata) \quad R^2 = 0.679 \quad \text{Ecuación 53}$$

Puntos importantes:

Analizando las ecuaciones de las intensidades estratificadas por tamaño de partícula, se muestra que la pendiente de las intensidades es mayor cuando son más finas las partículas.

Para el caso de los canales de Plata y Plata background las pendientes son menores y tienden a tener una baja correlación por la cantidad de contenidos metálicos.

A continuación, se describe la siguiente sección se evaluará estadísticamente mediante la correlación los contenidos metálicos de los elementos Plata, Plomo Zinc Cobre y Hierro y las intensidades del analizador de elementos en línea del periodo con Cribas e Hidrociclones.

#### 4.6 Evaluación de contenidos metálicos vs intensidades

La sección anterior se encontró que la dispersión de las intensidades del analizador de elementos en línea para plomo, zinc, cobre, hierro, plata y sólidos son afectadas por el tamaño de partícula estratificadas.

Después de analizar los contenidos metálicos y las intensidades por separado, en esta evaluación se busca determinar la correlación múltiple de cada contenido metálico con las intensidades de los canales de Plomo, Plata, Hierro, Zinc Sólidos y Plata Background.

Se efectuaron las correlaciones de las intensidades de Plomo, Plata, Hierro, Zinc, Sólidos y Plata background con los contenidos metálicos, para conocer cuál de los contenidos metálicos tiene mayor correlación con las intensidades de los elementos.

En la Tabla 27, en rojo se remarcan los contenidos metálicos de Plomo que tiene una alta correlación con la intensidad de Plomo, así también el Hierro con la intensidad de Hierro, los contenidos de Zinc con la intensidad de Zinc. Para los contenidos metálicos de Plata tiene una alta correlación con la intensidad del canal de Plata, Plata background y sólidos.

Tabla 27. Correlación de intensidades con los contenidos metálicos.

Contenidos		<b>Pb Intensidad</b>	<b>Ag Intensidad</b>	<b>Fe Intensidad</b>	<b>Zn Intensidad</b>	<b>Sólidos Int. Scatter</b>	<b>Ag Bg Intensidad</b>
<b>Au</b>	Pearson correlación	0.127	-0.222	0.087	0.08	-0.288	-0.277
	Pvalor	0.003	0	0.039	0.06	0	0
<b>Ag</b>	Pearson correlación	0.106	-0.149	0.103	0.067	-0.235	-0.235
	Pvalor	0.012	0	0.015	0.112	0	0
<b>Pb</b>	Pearson correlación	<b>0.734</b>	<b>-0.443</b>	0.431	0.723	-0.491	<b>-0.511</b>
	Pvalor	0	0	0	0	0	0
<b>Zn</b>	Pearson correlación	0.72	-0.406	0.454	<b>0.829</b>	-0.41	-0.434
	Pvalor	0	0	0	0	0	0
<b>Cu</b>	Pearson correlación	0.624	-0.338	0.491	0.589	-0.387	-0.412
	Pvalor	0	0	0	0	0	0
<b>Fe</b>	Pearson correlación	0.538	-0.323	<b>0.506</b>	0.609	-0.397	-0.415
	Pvalor	0	0	0	0	0	0
<b>As</b>	Pearson correlación	0.189	-0.164	0.213	0.295	-0.172	-0.18
	Pvalor	0	0	0	0	0	0
<b>P80 (µm)</b>	Pearson correlación	-0.173	0.088	-0.162	-0.083	0.179	0.18
	Pvalor	0	0.038	0	0.05	0	0
<b>-200 Mallas</b>	Pearson correlación	0.186	-0.100	0.175	0.089	-0.205	-0.207
	Pvalor	0	0.017	0	0.035	0	0

Puntos importantes:

Debido a las composiciones y a las asociaciones mineralógicas de algunos elementos, estas pueden tener un coeficiente de correlación alto con las intensidades de los canales.

Los resultados de la tabla 27 muestra que los contenidos metálicos de un elemento que se pueden utilizar dos o más intensidades para realizar una ecuación de calibración multivariable.

El tamaño de partícula P80 tiene una correlación con las intensidades, pero aun así se puede generar un modelo lineal para determinar el tamaño de partícula en el analizador de elemento en línea Courier.

A continuación, se evaluará estadísticamente las muestras de calibración de los elementos Plata, Plomo Zinc Cobre y Hierro y las intensidades del analizador de elementos en línea del periodo con Cribas e Hidrociclones.

#### 4.7 Evaluación de Análisis de muestras de calibración.

En esta sección se evaluará la muestra tomada para calibración del analizador de elementos en línea durante los periodos de Cribas e Hidrociclones, donde se analizará el comportamiento del tamaño de partícula y el efecto en las intensidades de los elementos Plata, Plomo Zinc Hierro y Sólidos.

La siguiente etapa se evaluaron la media del tamaño de partícula y las intensidades del analizador de elementos en línea Courier, obtenidas de muestras de calibración en Cribas e Hidrociclones, Figura 75. Se efectuó conforme al procedimiento empleado para realizar pruebas estadísticas por medio de T-student.

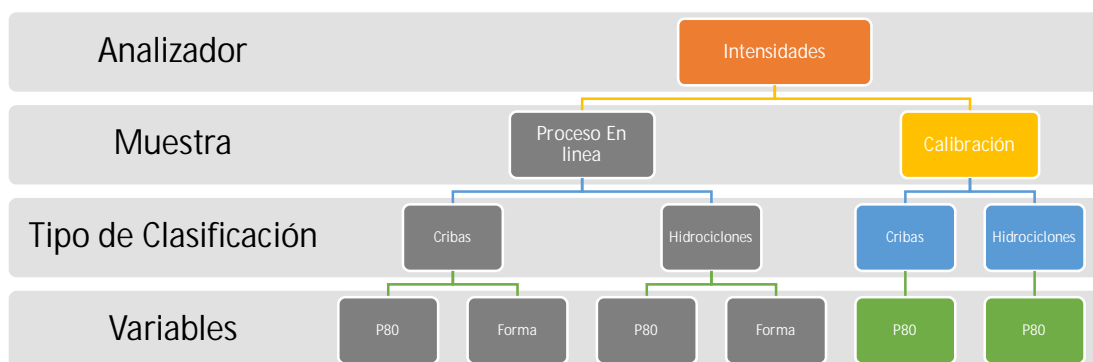


Figura 75. Procedimiento empleado para realizar pruebas estadísticas de las muestras de calibración en los periodos de cribas e hidrociclones.

##### 4.7.1 Tamaño de partícula de muestras de calibración.

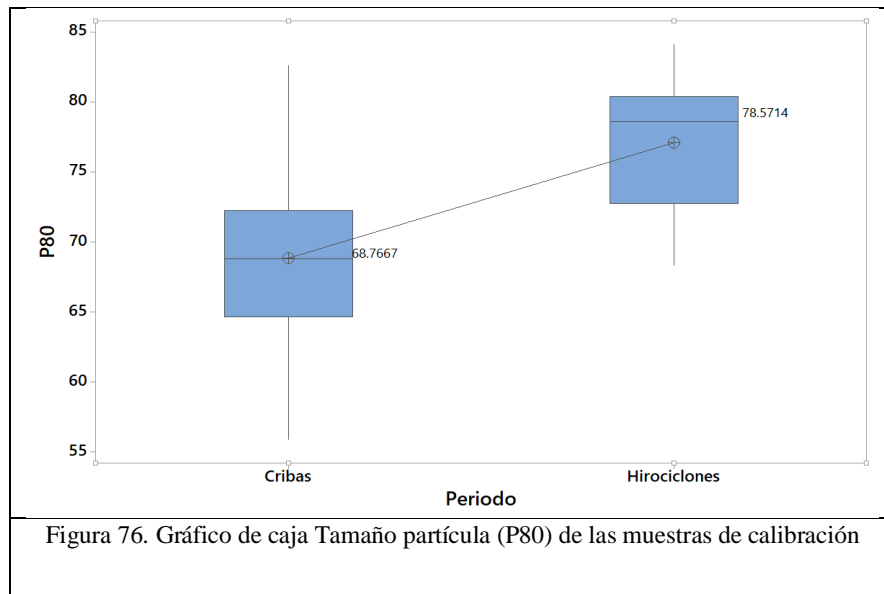
La Tabla 28 muestra que el resultado estadístico del tamaño de partícula de las muestras de calibración por medio de la prueba de T, que indica que la media con cribas es de 68.86 y con hidrociclones la media es 77.06 por lo que estadísticamente P-Valor es menor a 0.05 por lo que estadísticamente concluimos que las medias son diferentes.

Tabla 28. Prueba T e Índice de confianza de dos muestras: Tamaño de partícula P80 de las muestras de calibración, en los Periodos con cribas y con Hidrociclones.

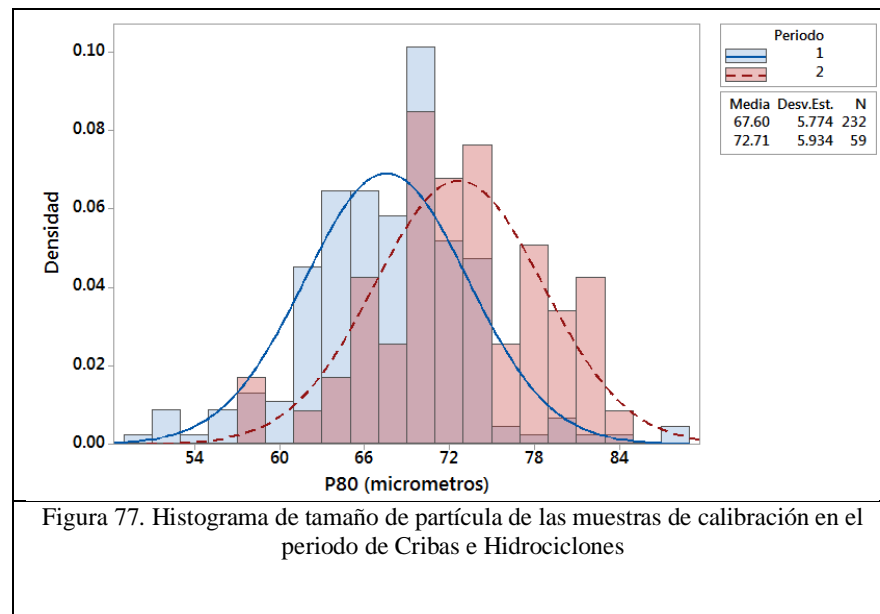
Periodo	N	Media	Desviación Estándar (StDev)	Error estándar
Cribas	94	68.86	6.97	0.72
Hidrociclones	9	77.06	4.93	1.6

Diferencia	= $\mu (1) - \mu (2)$		
Estimación por diferencia:	-8.20		
95% CI por Diferencia:	(-12.14, -4.26)		
T-Prueba de Diferencia = 0 (vs $\neq$ ):	T-Valor = -4.58	P-Valor = 0.0001	DF = 11

La Figura 76 muestra el gráfico de caja del tamaño de partícula P80 con cribas vs hidrociclones, se puede observar la variabilidad.



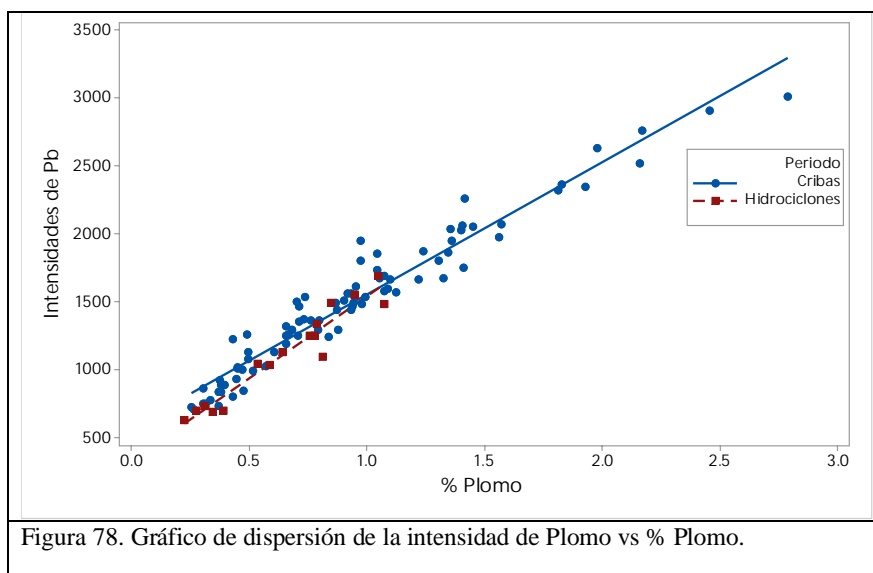
La Figura 77 muestra el histograma del tamaño de partícula P80 en ambos periodos donde la desviación estándar es mayor con hidrociclones.



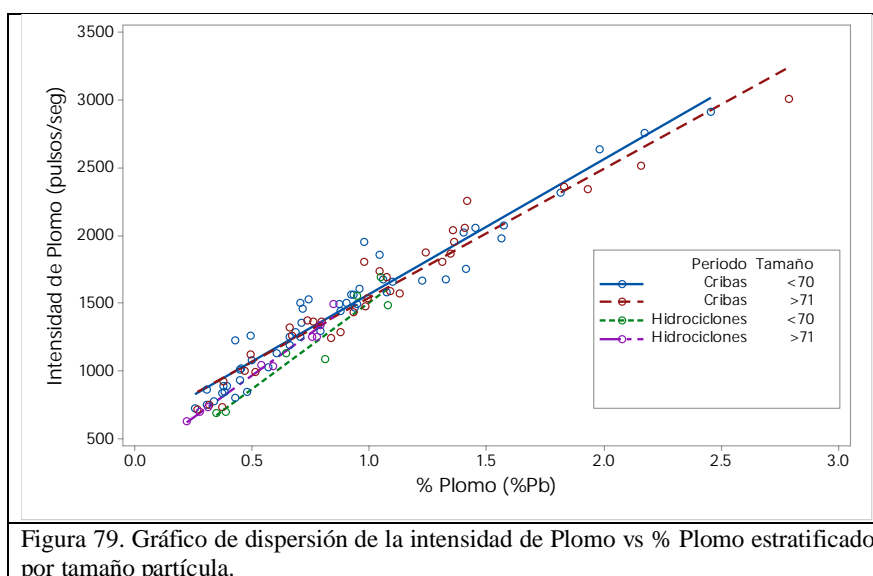


#### 4.7.2 Intensidad de Plomo de muestras de calibración.

La Figura 78 muestra el gráfico de dispersión correspondiente a la intensidad de Plomo procedentes de las muestras de calibración vs % Plomo ensayado en el laboratorio usando cribas e hidrociclones, donde la fluorescencia de Raros X nos indica que existe una correlación directamente proporcional entre la cantidad del elemento vs intensidad del elemento, también se observan que van paralelas en los periodos de cribas e hidrociclones.



Para determinar el efecto del tamaño de partícula P80 se estratificó por grupos, de acuerdo con el intervalo de tamaño de partícula; y la Figura 79, muestra las diferentes líneas de regresión.



La ecuación de la recta con cribas, nos indica un  $R^2 = 0.941$  a partir de la Ecuación 54, y con hidrociclones es  $R^2 = 0.929$  de acuerdo con la Ecuación 55.

$$\text{Int Pb (Cribas)} = 582.6 - 971.4 x (\% \text{ Plomo}) \quad R^2 = 0.941 \quad \text{Ecuación 54}$$

$$\text{Int Pb (Hidrociclones)} = 333.7 - 1203 x (\% \text{ Plomo}) \quad R^2 = 0.929 \quad \text{Ecuación 55}$$

Las ecuaciones lineales 54 y 55 con cribas, se estratifican por el tamaño de partícula P80 menor de 70 y mayor de 71 micrómetros, se muestran donde la pendiente es mayor cuando el Plomo tiene mayor correlación con tamaño de partícula fina.

$$\text{Int Pb (< } 70\mu\text{m)} = 569.8 + 994.2 x (\% \text{ Plomo}) \quad R^2 = 0.938 \quad \text{Ecuación 56}$$

$$\text{Int Pb (> } 71\mu\text{m)} = 595.6 + 948.3 x (\% \text{ Plomo}) \quad R^2 = 0.945 \quad \text{Ecuación 57}$$

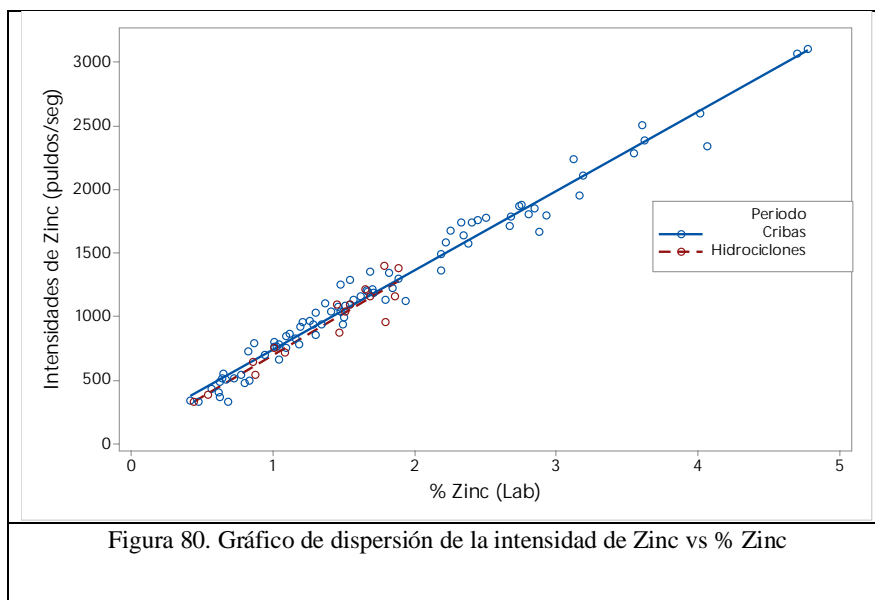
Las ecuaciones lineales 56 y 57 con hidrociclones, se estratifican por el tamaño de partícula P80 menor de 70 y mayor de 71 micrómetros, se muestran donde la pendiente es mayor cuando el Plomo tiene mayor correlación con tamaño de partícula fina.

$$\text{Int Pb (< } 70\mu\text{m)} = 227 + 1280 x (\% \text{ Plomo}) \quad R^2 = 0.919 \quad \text{Ecuación 58}$$

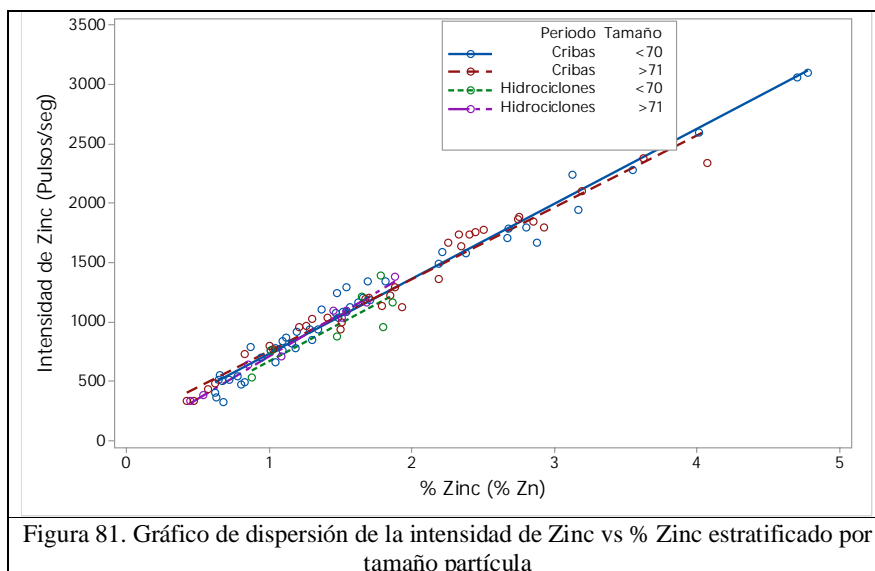
$$\text{Int Pb (> } 71\mu\text{m)} = 347 + 1245 x (\% \text{ Plomo}) \quad R^2 = 0.979 \quad \text{Ecuación 59}$$

### 4.7.3 Intensidad de Zinc de muestras de calibración.

La Figura 80 muestra el gráfico de dispersión correspondiente a la intensidad de Zinc procedentes de las muestras de calibración vs % Zinc ensayado en el laboratorio usando cribas e hidrociclones, donde la fluorescencia de Rx's nos indica que existe una correlación directamente proporcional entre la cantidad del elemento vs intensidad del elemento, también se observan que van paralelas en los periodos de cribas e hidrociclones.



Para determinar el efecto del tamaño de partícula P80 en los periodos de clasificación por cribas e hidrociclones, se estratificó por grupos de acuerdo con el intervalo de tamaño de partícula; y la Figura 81, muestra las diferentes líneas de regresión.



La ecuación de la recta para las intensidades de Zinc con cribas nos indica un  $R^2 = 0.975$  de acuerdo con la Ecuación 60, y con hidrociclones es  $R^2 = 0.896$  a partir de la Ecuación 61.

$$Int\ Zn\ (Cribas) = 122.3 + 622\ x\ (\% Plomo)\ R^2 = 0.97 \quad \text{Ecuación 60}$$

$$Int\ Zn\ (Hidrociclones) = 36.07 + 662.6\ x\ (\% Plomo)\ R^2 = 0.896 \quad \text{Ecuación 61}$$

Las ecuaciones 62 y 63 con cribas, se estratifican por el tamaño de partícula P80 menor de 70 y mayor de 71 micrómetros, se muestran donde la pendiente es mayor cuando en Zinc tiene mayor correlación con tamaño de partícula fina.

$$Int\ Zn\ (< 70\mu m) = 106.9 + 630\ x\ (\% Zinc)\ R^2 = 0.979 \quad \text{Ecuación 62}$$

$$Int\ Zn\ (> 71\mu m) = 158.1 + 603.3\ x\ (\% Zinc)\ R^2 = 0.966 \quad \text{Ecuación 63}$$

Las ecuaciones 63 y 64 con hidrociclones, se estratifican por el tamaño de partícula P80 menor de 70 y mayor de 71 micrómetros, se muestran donde la pendiente es mayor cuando el Zinc tiene mayor correlación con tamaño de partícula fina.

$$Int\ Zn\ (< 70\mu m) = 45.4 + 631\ x\ (\% Zinc)\ R^2 = 0.735 \quad \text{Ecuación 64}$$

$$Int\ Zn\ (> 71\mu m) = 158.1 + 603.3\ x\ (\% Zinc)\ R^2 = 0.966 \quad \text{Ecuación 65}$$

#### 4.7.4 Intensidad de Hierro de muestras de calibración.

La Figura 82 muestra el gráfico de dispersión correspondiente a la intensidad de Hierro procedentes de las muestras de calibración vs % hierro ensayado en el laboratorio usando cribas e hidrociclones, donde la fluorescencia de Rx's nos indica que existe una correlación directamente proporcional entre la cantidad del elemento vs intensidad del elemento, también se observan que van cercanamente en los periodos de cribas e hidrociclones.

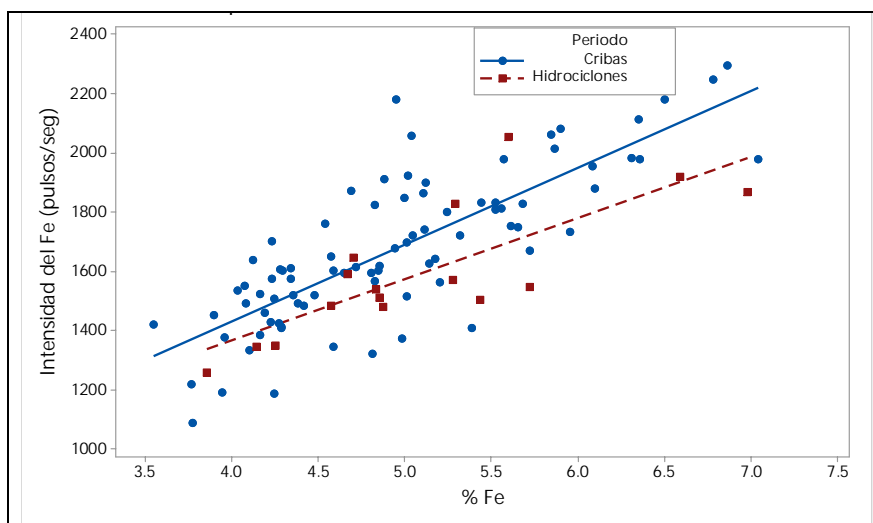


Figura 82. Gráfico de dispersión de la intensidad de Hierro vs % Hierro.

Para determinar el efecto del tamaño de partícula P80 en los periodos de clasificación por cribas e hidrociclones, se estratificó por grupos, de acuerdo con el intervalo de tamaño de partícula; y la Figura 83, muestra las diferentes líneas de regresión.

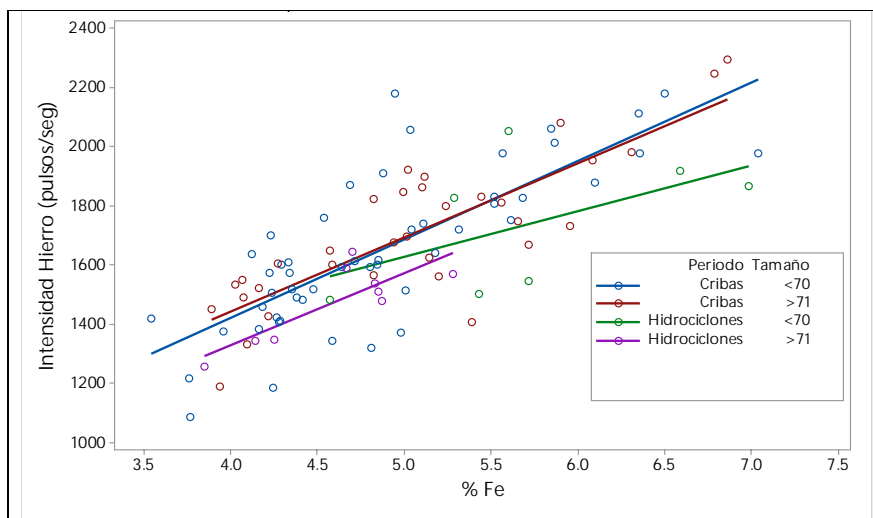


Figura 83. Gráfico de dispersión de la intensidad de Hierro vs % Hierro estratificado por tamaño partícula.

La ecuación de la recta para las intensidades de Hierro con cribas nos indica un  $R^2 = 0.636$  de acuerdo a la Ecuación 66, y con hidrociclones es  $R^2 = 0.6105$  a partir de la Ecuación 67; la pendiente es menor porque la media del tamaño de partícula P80 de hierro con cribas es  $68 \mu\text{m}$  y con hidrociclones es  $78 \mu\text{m}$ .

$$\text{Int Fe (Cribas)} = 391 + 259 x (\% \text{ Hierro}) \quad R^2 = 0.636 \quad \text{Ecuación 66}$$

$$\text{Int Fe (Hidrociclones)} = 540.9 + 205.9 x (\% \text{ Hierro}) \quad R^2 = 0.6105 \quad \text{Ecuación 67}$$

Las ecuaciones lineales 67 y 68 para las intensidades de hierro en función del porcentaje de hierro con cribas se estratifican por el tamaño de partícula P80 menor de 70 y mayor de 71 micrómetros, la pendiente es mayor cuando hierro tiene mayor correlación con tamaño de partícula.

$$\text{Int Fe (< } 70 \mu\text{m)} = 364.7 + 264.3 x (\% \text{ Hierro}) \quad R^2 = 0.604 \quad \text{Ecuación 68}$$

$$\text{Int Fe (> } 71 \mu\text{m)} = 438.2 + 251 x (\% \text{ Hierro}) \quad R^2 = 0.681 \quad \text{Ecuación 69}$$

Las ecuaciones lineales 68 y 69 para las intensidades de hierro en función del porcentaje de hierro con hidrociclones, se estratifican por el tamaño de partícula P80 menor de 70 y mayor de 71 micrómetros, la pendiente es mayor cuando hierro tiene mayor correlación con el tamaño de partícula.

$$\text{Int Fe (< } 70 \mu\text{m)} = 859.6 + 153.6 x (\% \text{ Hierro}) \quad R^2 = 0.296 \quad \text{Ecuación 70}$$

$$\text{Int Fe (> } 71 \mu\text{m)} = 344.6 + 245.5 x (\% \text{ Hierro}) \quad R^2 = 0.687 \quad \text{Ecuación 71}$$

#### 4.7.5 Intensidad de Plata de muestras de calibración.

La Figura 84 muestra el gráfico de dispersión correspondiente a la intensidad de Plata procedentes de las muestras de calibración vs % plata ensayada en el laboratorio usando cribas e hidrociclones, donde la fluorescencia de Rx nos indica que existe una correlación directamente proporcional entre la cantidad del elemento vs intensidad del elemento, también se observan que van cercanamente en los periodos de cribas e hidrociclones.

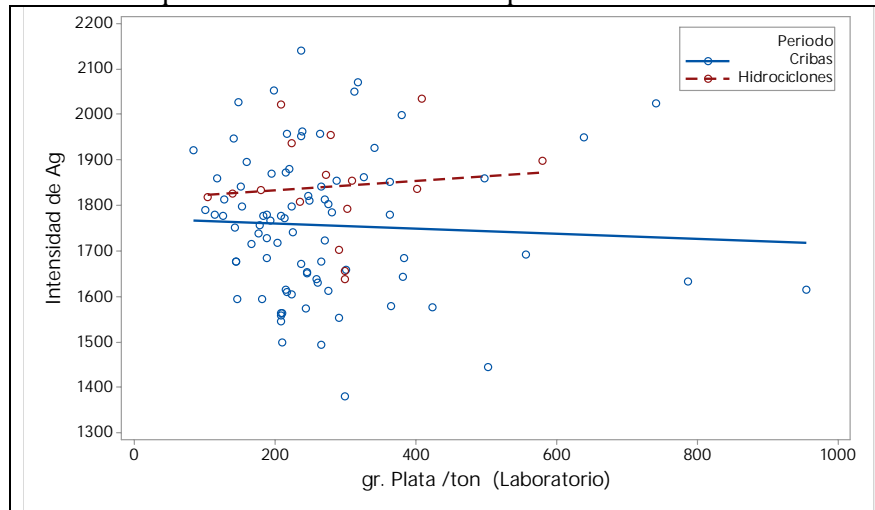


Figura 84. Gráfico de dispersión de la intensidad de Plata vs gr. Plata/ton

Para determinar el efecto del tamaño de partícula P80 en los periodos de clasificación por cribas e hidrociclones, se estratificó por grupos, de acuerdo con el intervalo de tamaño de partícula; y la Figura 85, muestra las diferentes líneas de regresión.

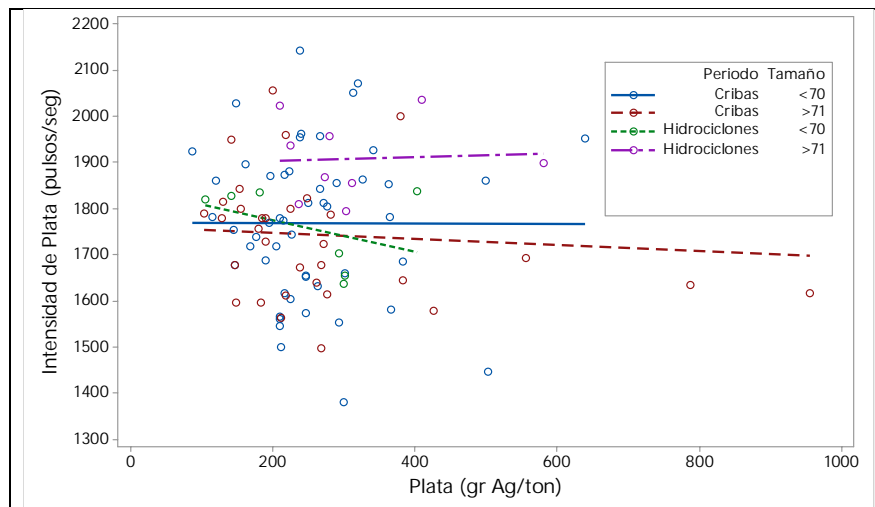


Figura 85. Gráfico de dispersión de la intensidad de Plata vs gr. Plata/ton estratificado por tamaño partícula.

La ecuación de la recta para las intensidades de Plata (Int Ag) con cribas nos indica un  $R^2 = 0.003$  de acuerdo con la Ecuación 72; y con hidrociclones es  $R^2 = 0.011$  a partir de la ecuación 73.

$$\text{Int Ag (Cribas)} = 1778 - 0.058 x \left( \frac{\text{Gr}}{\text{ton}} \text{Ag} \right) \quad R^2 = 0.003 \quad \text{Ecuación 72}$$

$$\text{Int Ag (Hidrociclones)} = 1812 + 0.1057 x \left( \frac{\text{Gr}}{\text{ton}} \text{Ag} \right) \quad R^2 = 0.011\% \quad \text{Ecuación 73}$$

Las ecuaciones lineales 74 y 75 con cribas se estratifican por el tamaño de partícula P80 menor de  $70 \mu\text{m}$  y mayor de  $71 \mu\text{m}$ , se muestran pendientes cercanas a cero, cuando en el caso de la Plata tienden a ser paralelas.

$$\text{Int Ag (< } 70\mu\text{m)} = 1768 - 0.0019 x \left( \frac{\text{Gr}}{\text{ton}} \text{Ag} \right) \quad R^2 = 0\% \quad \text{Ecuación 74}$$

$$\text{Int Ag (> } 71\mu\text{m)} = 1760 - 0.0658 x \left( \frac{\text{Gr}}{\text{ton}} \text{Ag} \right) \quad R^2 = 0.9\% \quad \text{Ecuación 75}$$

Las ecuaciones lineales 76 y 77 con hidrociclones se estratifican por el tamaño de partícula P80 menor de  $70\mu\text{m}$  y mayor de  $71\mu\text{m}$ , se muestran pendientes casi cero, cuando en el caso de la Plata tienden a ser paralelas.

$$\text{Int Ag (< } 70\mu\text{m)} = 1843 - 0.3450 x \left( \frac{\text{Gr}}{\text{ton}} \text{Ag} \right) \quad R^2 = 0.166 \quad \text{Ecuación 76}$$

$$\text{Int Ag (> } 71\mu\text{m)} = 1896 + 0.035 x \left( \frac{\text{Gr}}{\text{ton}} \text{Ag} \right) \quad R^2 = 0.002 \quad \text{Ecuación 77}$$



#### 4.7.6 Intensidad de Plata background de muestras de calibración.

La Figura 86 muestra el gráfico de dispersión correspondiente a la intensidad de plata background procedentes de las muestras de calibración vs % plata ensayada en el laboratorio usando cribas e hidrociclones, donde la fluorescencia de Rx's nos indica que existe una correlación inversamente proporcional entre la cantidad del elemento vs intensidad del elemento, también se observan que van paralelas en los periodos de cribas e hidrociclones.

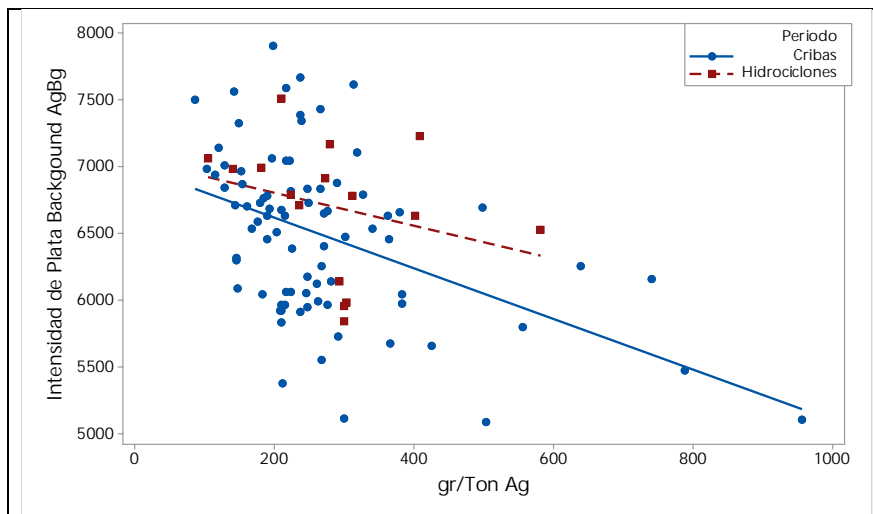


Figura 86. Gráfico de dispersión de la intensidad de Plata Background vs gr. Plata/ton

Para determinar el efecto del tamaño de partícula P80 y los periodos de clasificación con cribas e hidrociclones, se estratificó por grupos de acuerdo con el intervalo de tamaño de partícula; y en la Figura 87, se muestran las diferentes líneas de regresión.

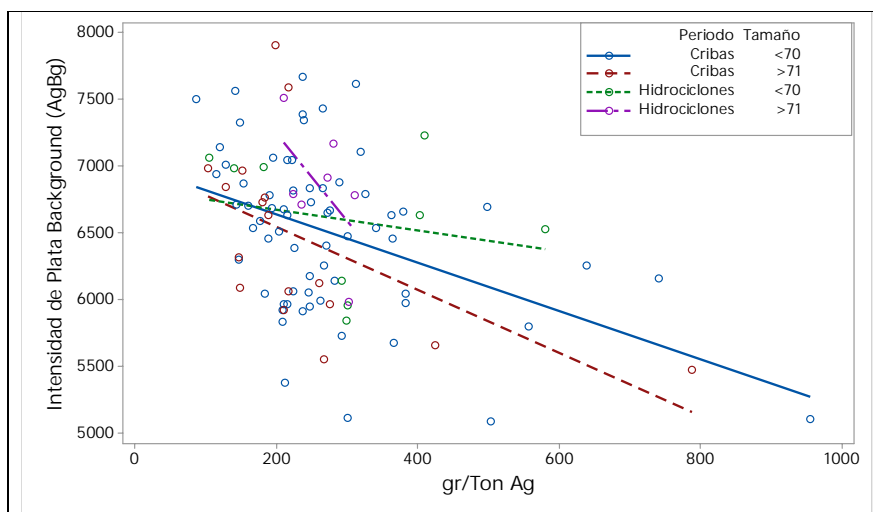


Figura 87. Gráfico de dispersión de la intensidad de Plata Background vs gr. Plata/ton estratificado por tamaño partícula.

La ecuación de la recta para las intensidades de Plata Background con cribas nos indica un  $R^2$  0.207 de acuerdo con la Ecuación 78, y con hidrociclones es  $R^2 = 0.08$  a partir de la Ecuación 79.

$$Int\ AgBg\ (Cribas) = 7002 - 1.901 \times \left(\frac{Gr}{ton}\ Ag\right) \quad R^2 = 0.207 \quad \text{Ecuación 78}$$

$$Int\ AgBg\ (Hidrociclones) = 7052 - 1.23 \times \left(\frac{Gr}{ton}\ Ag\right) \quad R^2 = 0.08 \quad \text{Ecuación 79}$$

Las ecuaciones lineales 80 y 81 con cribas se estratifican por el tamaño de partícula P80 menor de 70  $\mu\text{m}$  y mayor de 71  $\mu\text{m}$ , en donde la pendiente negativa es mayor cuando la Plata tiende a ser paralela con tamaño de partícula fina.

$$Int\ AgBg\ (< 70\mu\text{m}) = 7002 - 1.811 \times \left(\frac{Gr}{ton}\ Ag\right) \quad R^2 = 0.19 \quad \text{Ecuación 80}$$

$$Int\ AgBg\ (> 71\mu\text{m}) = 7012 - 2.348 \times \left(\frac{Gr}{ton}\ Ag\right) \quad R^2 = 0.294 \quad \text{Ecuación 81}$$

Las ecuaciones lineales 82 y 83 con hidrociclones se estratifican por el tamaño de partícula P80 menor de 70  $\mu\text{m}$  y mayor de 71  $\mu\text{m}$ , en donde se muestra la pendiente negativa cuando en el caso de la Plata, tiende a ser paralela, con el tamaño de partícula.

$$Int\ AgBg\ (< 70\mu\text{m}) = 6835 - 0.788 \times \left(\frac{Gr}{ton}\ Ag\right) \quad R^2 = 0.052 \quad \text{Ecuación 82}$$

$$Int\ AgBg\ (> 71\mu\text{m}) = 8563 - 6.575 \times \left(\frac{Gr}{ton}\ Ag\right) \quad R^2 = 0.306 \quad \text{Ecuación 83}$$

**4.7.7 Intensidad de Sólidos de muestras de calibración.**

La Figura 88 muestra el gráfico de dispersión correspondiente a la intensidad de sólidos procedentes de las muestras de calibración vs % sólidos ensayado en el laboratorio usando cribas e hidrociclones, donde la fluorescencia de rayos X nos indica que existe una correlación inversamente proporcional entre la cantidad del elemento vs intensidad del elemento, también se observan que van paralelas en los periodos de cribas e hidrociclones.

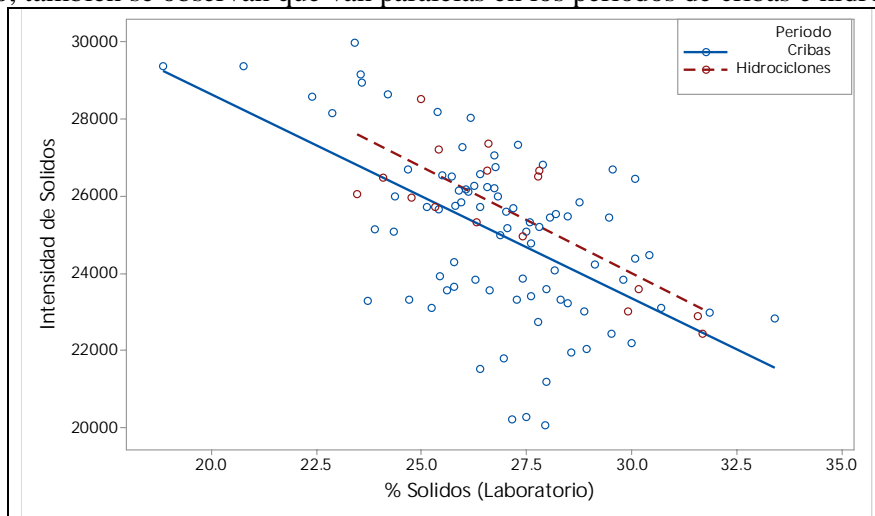


Figura 88. Gráfico de dispersión de la intensidad de Sólido vs % Sólidos

Para determinar el efecto del tamaño de partícula P80 y el periodo de clasificación en cribas e hidrociclones, se estratificó por grupos, de acuerdo con el intervalo de tamaño de partícula; y en la Figura 89 se muestran las diferentes líneas de regresión.

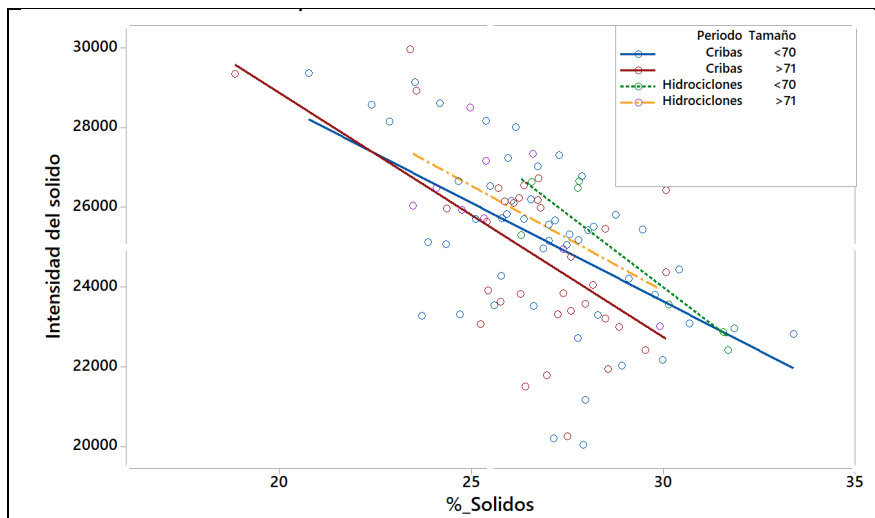


Figura 89. Gráfico de dispersión de la intensidad de sólido vs % Sólidos estratificado por tamaño partícula.

La ecuación de la recta para las intensidades de Sólidos con cribas nos indica un  $R^2 = 0.309$  de acuerdo con la Ecuación 84, y con hidrociclones es  $R^2 = 0.639$  a partir de la Ecuación 85, donde las ecuaciones tienden a ser paralelas

$$\text{Int Sol (Cribas)} = 39185 - 528.3x (\% \text{ Sólidos}) \quad R^2 = 0.309 \quad \text{Ecuación 84}$$

$$\text{Int Sol (Hidrociclones)} = 40506 - 550.9x (\% \text{ Plomo}) \quad R^2 = 0.639 \quad \text{Ecuación 85}$$

Las Ecuaciones lineales 86 y 87 con cribas, se estratifican por el tamaño de partícula P80 menor de  $70 \mu\text{m}$  y mayor de  $71 \mu\text{m}$ , en donde se muestra que las pendientes tienden a ser paralelas.

$$\text{Int Sol (< } 70\mu\text{m)} = 38444 - 493.3x (\% \text{ Sólidos}) \quad R^2 = 0.303 \quad \text{Ecuación 86}$$

$$\text{Int Sol (> } 71\mu\text{m)} = 41148 - 613.6x (\% \text{ Sólidos}) \quad R^2 = 0.347 \quad \text{Ecuación 87}$$

Las Ecuaciones lineales 88 y 89 con hidrociclones se estratifican por el tamaño de partícula P80 menor de  $70 \mu\text{m}$  y mayor de  $71 \mu\text{m}$ , en donde se muestra que las pendientes son paralelas.

$$\text{Int Sol (< } 70\mu\text{m)} = 46037 - 734.8x (\% \text{ Sólidos}) \quad R^2 = 0.806 \quad \text{Ecuación 88}$$

$$\text{Int Sol (> } 71\mu\text{m)} = 39644 - 525.2x (\% \text{ Sólidos}) \quad R^2 = 0.431 \quad \text{Ecuación 89}$$

Puntos importantes:

Las intensidades de los elementos tienen correlación directa o inversamente proporcional con el ensaye de cada elemento de interés, adicionalmente se agregó el tamaño de partícula para determinar si existe correlación con las intensidades, ya que el resultado tiene un coeficiente de correlación alto e indica que estadísticamente afecta a la intensidad, por lo tanto, concluimos que a menor tamaño de partícula la intensidad se incrementa.

A continuación, se elaborarán los modelos de calibración del analizador de elementos en línea con las muestras obtenidas durante el proceso de calibración del analizador de elementos en línea durante los dos periodos con cribas e hidrociclones.

## 4.8 Elaboración de modelos multivariantes para la calibración.

En la evaluación 4.6 se identificó que en ambos periodos las muestras para calibración del analizador de elementos en línea se ven afectados por el tamaño de partícula P80, a continuación se mostraran los modelos de calibración para el analizador Courier para el periodo de cribas y el periodo de hidrociclones.

Se integró un modelo de calibración para calcular el tamaño de partícula P80 con las intensidades, Plata, Plomo, Zinc, Hierro y Sólidos y se compararan para ver el efecto en los diferentes modelos.

### 4.8.1 Modelo multivariable del tamaño de partícula P80

Para el P80 con Cribas, la Figura 90 muestra el modelo calculado con el software Outocal, la Figura 91 muestra el gráfico de dispersión donde muestra en el *eje x* el P80 de laboratorio y en el *eje y* muestra el modelo P80 calculado con las intensidades del analizador Courier.

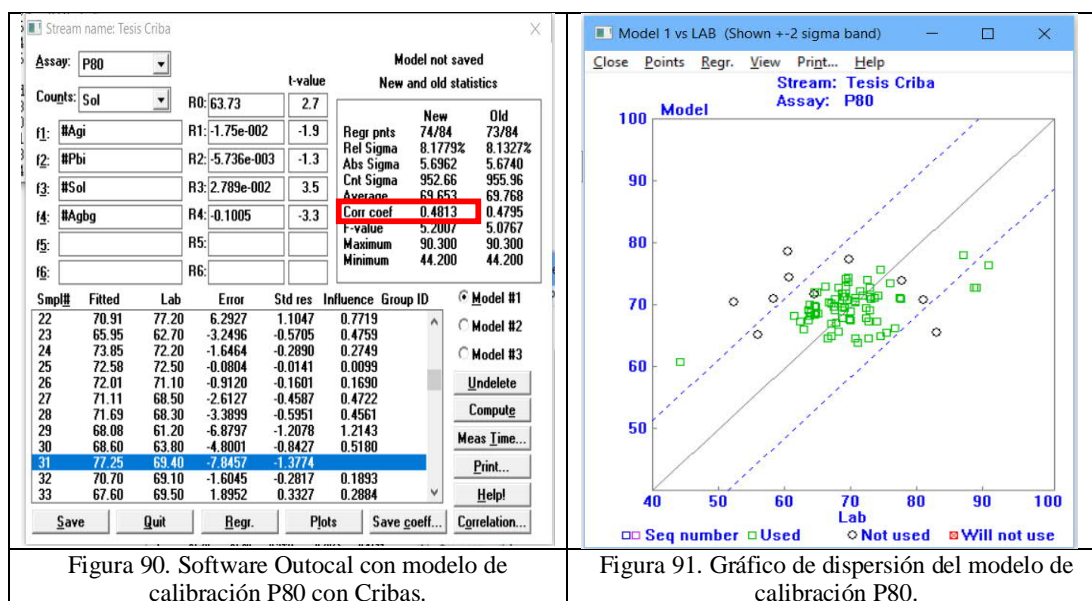


Figura 90. Software Outocal con modelo de calibración P80 con Cribas.

Figura 91. Gráfico de dispersión del modelo de calibración P80.

Para el P80 con Hidrociclones, la Figura 92 muestra el modelo calculado con el software Outocal, la Figura 93 muestra el gráfico de dispersión donde muestra en el *eje x* el P80 de laboratorio y en el *eje y* muestra el modelo P80 calculado con las intensidades del analizador Courier.

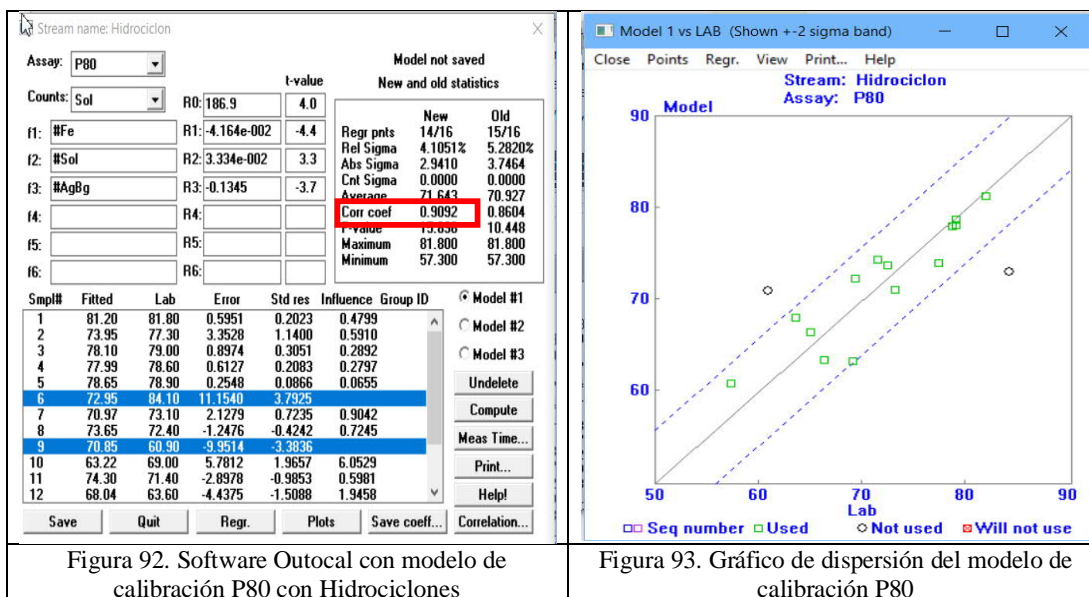


Figura 92. Software Outocal con modelo de calibración P80 con Hidrociclones

Figura 93. Gráfico de dispersión del modelo de calibración P80

La Tabla 29 muestra la comparativa de los resultados estadísticos del modelo con muestras del periodo de Cribas y el periodo de Hidrociclones para el P80.

Tabla 29. Resultados estadísticos del modelo de calibración para P80		
	Cribas	Hidrociclones
Muestras	74	14
Coefficiente de correlación	0.4813	0.9092
Relativo Sigma	8.17%	4.1%
Absoluto Sigma	5.69	2.94
Fvalor	5.2	15.89
Máximo	90	81.8
Mínimo	44	57.3

La Ecuación 90 muestra el modelo de P80 calculado para el periodo de Cribas, la cual está en función de las intensidades de Plata, Plomo, Sólidos y Plata Background donde el Coeficiente de correlación es 0.48.

$$P(80) = 63.73 - Ag * 1.75x10^{-2} - Pbx5.73x10^{-3} + Solx2.78x10^{-2} - AgBgx0.1005$$

Ecuación 90

La Ecuación 91 muestra el modelo de P80 calculado para el periodo de Hidrociclones, la cual está en función de las intensidades de hierro, Sólidos y Plata Background donde el Coeficiente de correlación es 0.9092

$$P(80) = 186.9 - Fe * 4.16x10^{-2} + Solx3.33x10^{-2} - AgBgx0.13$$

Ecuación 91

Después de elaborar los dos modelos de calibración para el P80 utilizando las intensidades para determinar líneas de regresión de ambos modelos, la Figura 94 muestra la línea en color azul que representa el modelo con las cribas y la línea de regresión de color roja con hidrociclones, donde se muestra que la pendiente cambia con el tamaño de partícula.

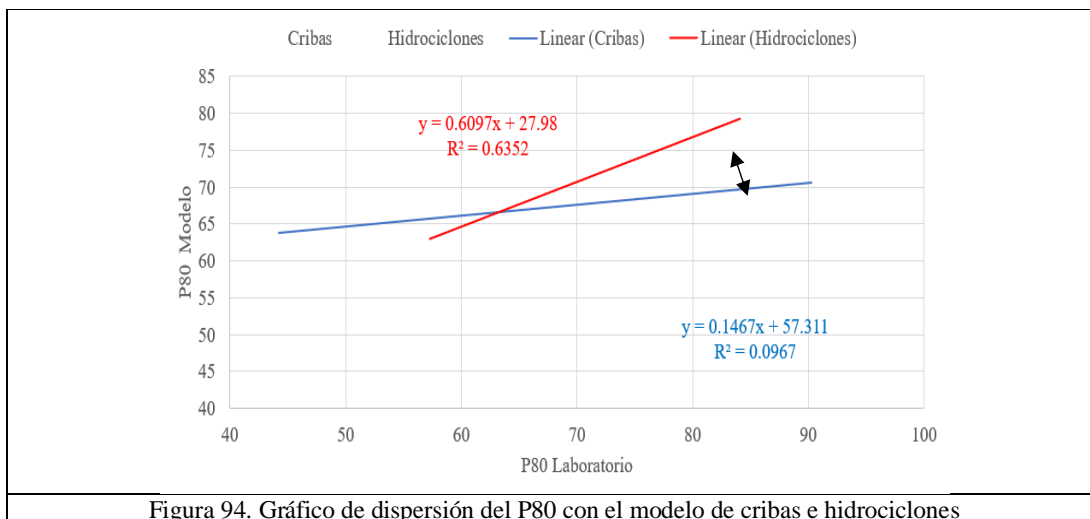


Figura 94. Gráfico de dispersión del P80 con el modelo de cribas e hidrociclones

#### Puntos importantes:

Los modelos de calibración multivariable calculado para cribas como para hidrociclones, para el tamaño de partícula en función de las intensidades, se calcularon con el programa de Outocal, los resultados revelaron que se puede generar una variable en el analizador de elementos Courier para medir el P80 en conjunto.

#### 4.8.2 Modelo multivariable para la Plata.

Para la Plata con el periodo de Cribas, la Figura 95 muestra el modelo calculado para la Plata con el software Outocal, la Figura 96 muestra el gráfico de dispersión donde muestra en el *eje x* la Plata de laboratorio y en el *eje y* muestra el modelo Plata calculado con las intensidades del analizador Courier.

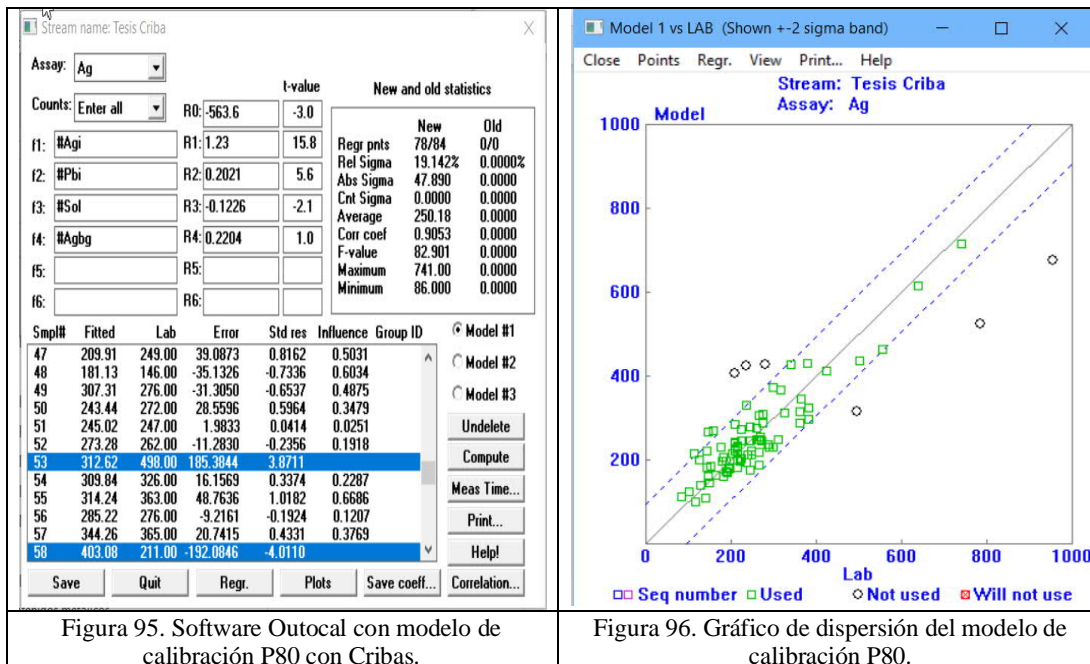


Figura 95. Software Outocal con modelo de calibración P80 con Cribas.

Figura 96. Gráfico de dispersión del modelo de calibración P80.

Para la Plata con el periodo de Hidrociclones, la Figura 97 muestra el modelo calculado con el software Outocal donde el coeficiente de correlación es 0.9615, la Figura 98 muestra el gráfico de dispersión, donde se muestra en el *eje x* la Plata de laboratorio y en el *eje y* muestra el modelo de la Plata calculado con las intensidades del analizador de elementos en línea Courier.



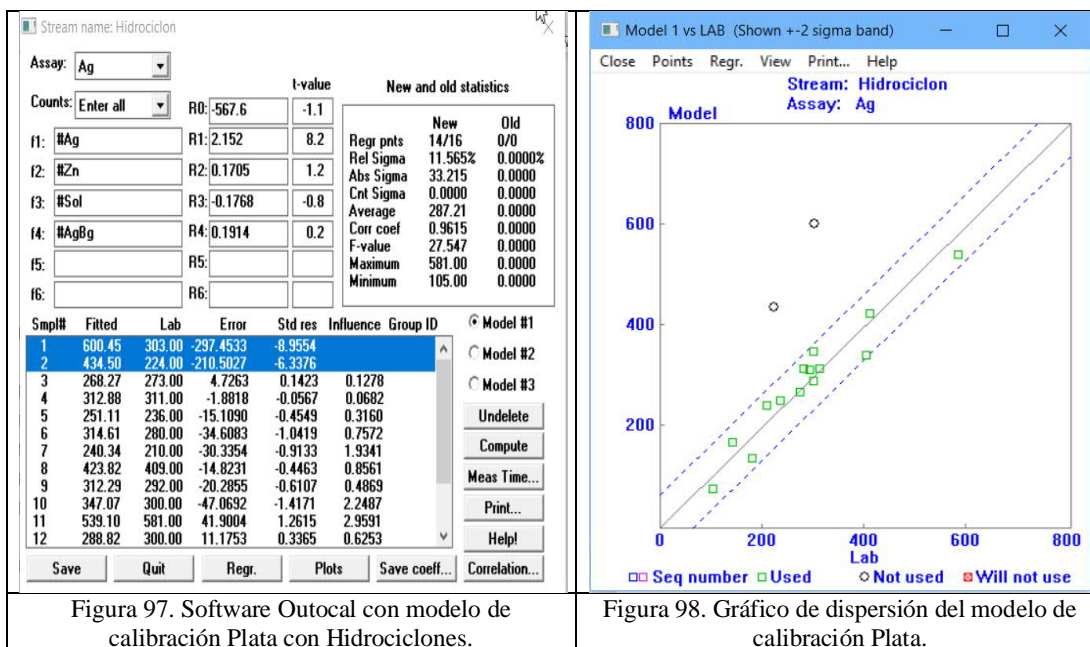


Figura 97. Software Outocal con modelo de calibración Plata con Hidrociclones.

Figura 98. Gráfico de dispersión del modelo de calibración Plata.

La Tabla 30 muestra la comparativa de los resultados estadísticos del modelo para la Plata con muestras del periodo de cribas y el periodo de hidrociclones.

Tabla 30. Resultados estadísticos del modelo de calibración para Plata		
	Cribas	Hidrociclones
Muestras	78	16
Coefficiente de correlación	0.9053	0.9615
Relativo Sigma	19.14%	11.56%
Absoluto Sigma	47.89	33.2
Fvalor	82.9	27.54
Máximo	741	581
Mínimo	86	105

La Ecuación 92 muestra el modelo de la Plata calculada para el periodo de cribas, la cual está en función de las intensidades de Plata, Plomo, Sólidos y Plata Background donde el Coeficiente de correlación es 0.905.

$$\frac{gr}{Ton} Ag = -563 - Ag * 1.23 + Pbx0.2021 - Solx0.1226 + AgBgx0.2204$$

Ecuación 92

La Ecuación 93 muestra el modelo de la Plata calculada para el periodo de hidrociclones, la cual está en función de las intensidades de Plata, Zinc, Sólidos y Plata Background donde el Coeficiente de correlación es 0.961.

$$\frac{gr}{ton} Ag = -567 + Agx2.15 + Znx0.17 - Solx0.1768 + AgBgx0.1914$$

Ecuación 93

Después de elaborar los dos modelos de calibración para la plata utilizando las intensidades, para determinar líneas de regresión de ambos modelos, la Figura 99 muestra la línea en color azul que representa el periodo con cribas y la línea de color roja con hidrociclones, donde se muestra que la pendiente disminuye cuando cambia el tamaño de partícula.

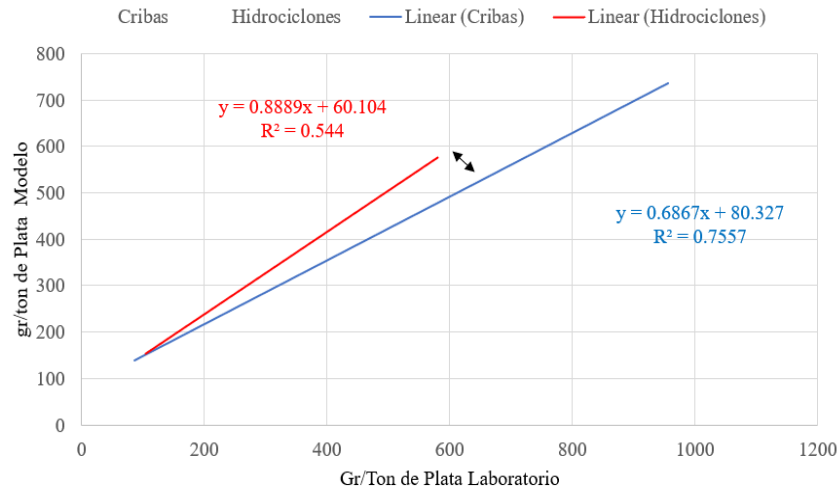


Figura 99. Gráfico de dispersión de la plata con el modelo de cribas e hidrociclones

### Puntos importantes

Los modelos de calibración multivariable calculado para cribas como para hidrociclones, para la Plata en función de las intensidades, se calcularon con el programa de Outocal, los resultados revelaron que el modelo multivariable está afectado al cambiar el tipo de clasificación.

### 4.8.3 Modelo multivariable para el Plomo

Para el Plomo con el periodo de Cribas, la Figura 100 muestra el modelo del Plomo calculado con el software Outocal, donde el coeficiente de correlación es 0.9786, la Figura 101 muestra el gráfico de dispersión donde muestra en el *eje x* el Plomo de laboratorio y en el *eje y* muestra el modelo del Plomo calculado con las intensidades del analizador Courier.

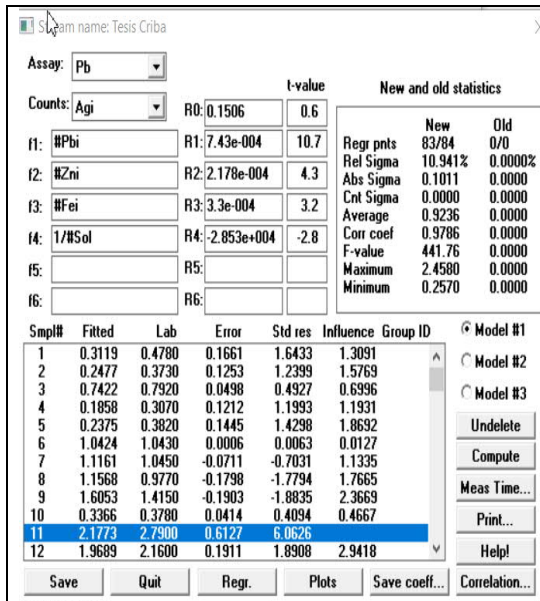


Figura 100. Software Outocal con modelo de calibración Plomo con Cribas.

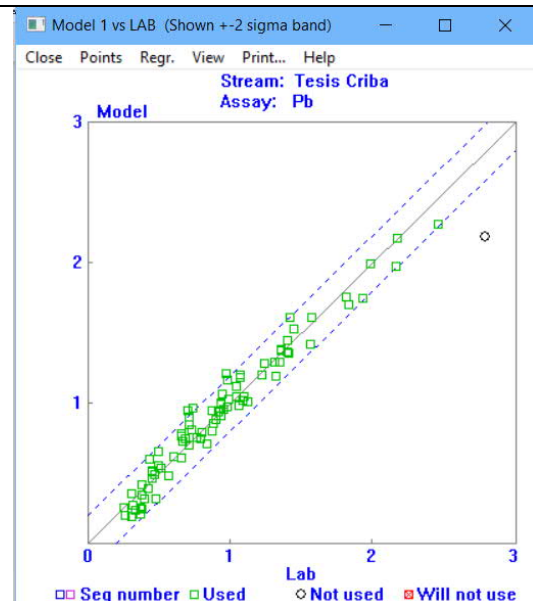


Figura 101. Gráfico de dispersión del modelo de calibración Plomo.

Para el Plomo con Hidrociclones, la Figura 102 muestra el modelo calculado con el software Outocal, donde le coeficiente de correlación es 0.9888, la Figura 103 muestra el gráfico de dispersión donde muestra en el *eje x* el porcentaje de Plomo de laboratorio y en el *eje y* el modelo del porcentaje de Plomo calculado con las intensidades del analizador Courier.

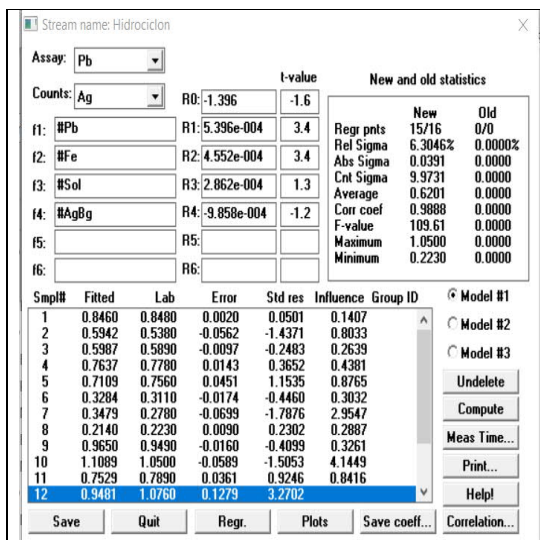


Figura 102. Software Outocal con modelo de calibración Plomo con Hidrociclones.

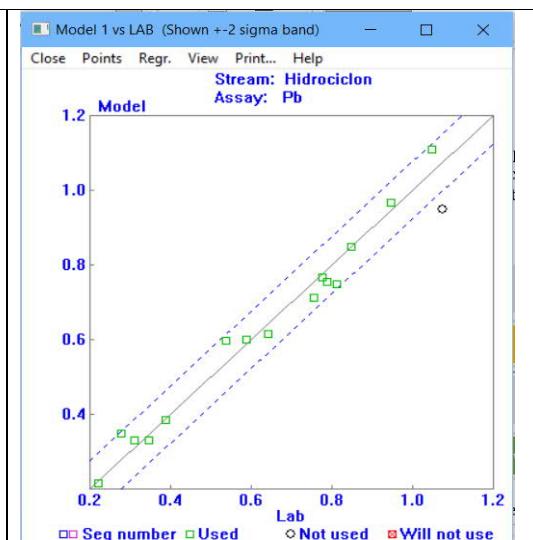


Figura 103. Gráfico de dispersión del modelo de calibración Plomo.

La Tabla 31 muestra la comparativa de los resultados estadísticos del modelo para el plomo con muestras del periodo de cribas y el periodo de hidrociclones.

Tabla 31. Resultados estadísticos del modelo de calibración para Plomo		
	Cribas	Hidrociclones
Muestras	83	15
Coefficiente de correlación	0.9786	0.9888
Relativo Sigma	10.94	6.304
Absoluto Sigma	0.101	0.039
Fvalor	441	109.6
Máximo	2.45	1.05
Mínimo	0.257	0.257

La Ecuación 94 muestra el modelo de Plomo calculado para el periodo de cribas, la cual está en función de las intensidades de Plomo, Zinc, Hierro y Sólidos, donde el Coeficiente de correlación es 0.978.

$$\%Pb = 0.15 + Pb \times 7.43 \times 10^{-4} + Zn \times 2.1 \times 10^{-4} + Fe \times 3.3 \times 10^{-4} - (1/sol) \times 2.85 \times 10^4$$

Ecuación 94

La Ecuación 95 muestra el modelo de Plomo calculado para el periodo de hidrociclones, la cual está en función de las intensidades de Plomo, Hierro, Sólidos y Plata Background donde el Coeficiente de correlación es 0.988.

$$\%Pb = -1.39 + Pb \times 5.39 \times 10^{-4} + Fe \times 4.55 \times 10^{-4} + Sol \times 2.86 \times 10^4 - AgBg \times 9.85 \times 10^{-4}$$

Ecuación 95

Después de elaborar los dos modelos de calibración para el Plomo utilizando las intensidades para determinar líneas de regresión de ambos modelos, la figura 104 muestra la línea en color azul que representa la con cribas y la línea de color roja con hidrociclones, donde se muestra que la pendiente de ambas van paralelas y empalmadas porque el tamaño de partícula de la galena es fino a comparación de los otros minerales.

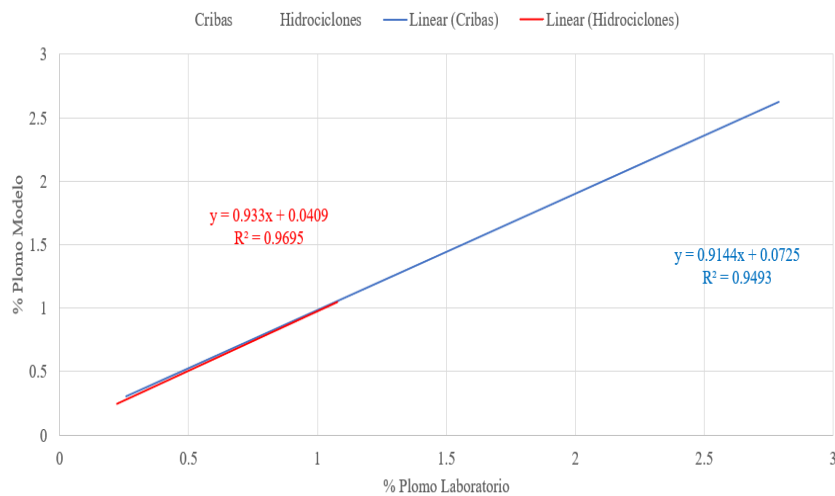


Figura 104. Gráfico de dispersión del plomo con el modelo de cribas e hidrociclones.  
Puntos importantes

El Plomo es el mismo en el circuito de molienda es más fino por sus características mineralógicas,

El mineral de plomo es el más fino

El modelo multivariable para usarlo con cribas considera las intensidades de Plomo, Zinc, hierro y el inverso de los sólidos

#### 4.8.4 Modelo Multivariable para el Zinc

Para el Zinc con el periodo con Cribas, la Figura 105 muestra el modelo del Zinc calculado con el software Outocal, donde el coeficiente de correlación es 0.9922, la Figura 106 muestra el gráfico de dispersión donde muestra en el *eje x* el Zinc de laboratorio y en el *eje y* muestra el modelo del Zinc calculado con las intensidades del analizador Courier.

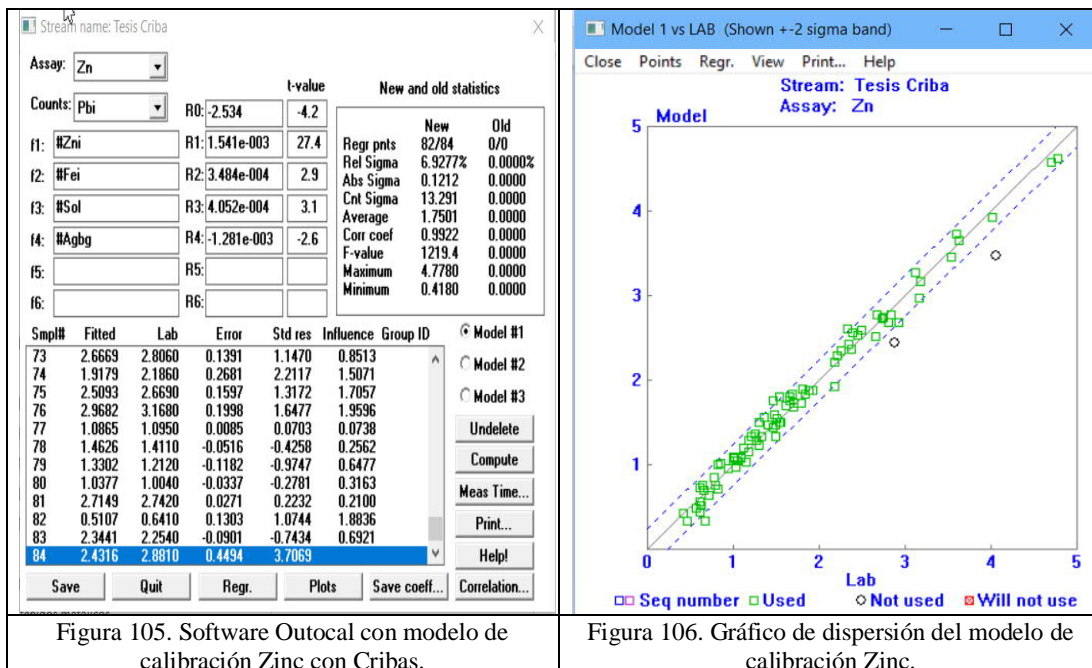


Figura 105. Software Outocal con modelo de calibración Zinc con Cribas.

Figura 106. Gráfico de dispersión del modelo de calibración Zinc.

Para el Zinc con Hidrociclones, la Figura 107 muestra el modelo calculado con el software Outocal, donde le coeficiente de correlación es 0.9922, la Figura 108 muestra el gráfico de dispersión donde muestra en el *eje x* el porcentaje de Zinc de laboratorio y en el *eje y* muestra el modelo del porcentaje de Zinc calculado con las intensidades del analizador Courier.

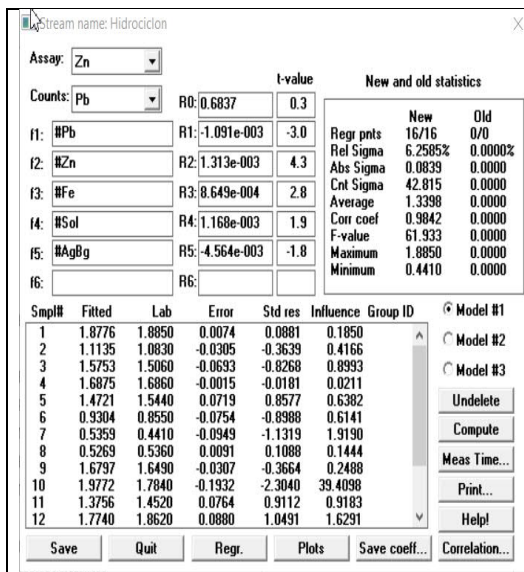


Figura 107. Software Outocal con modelo de calibración Zinc con Hidrociclón.

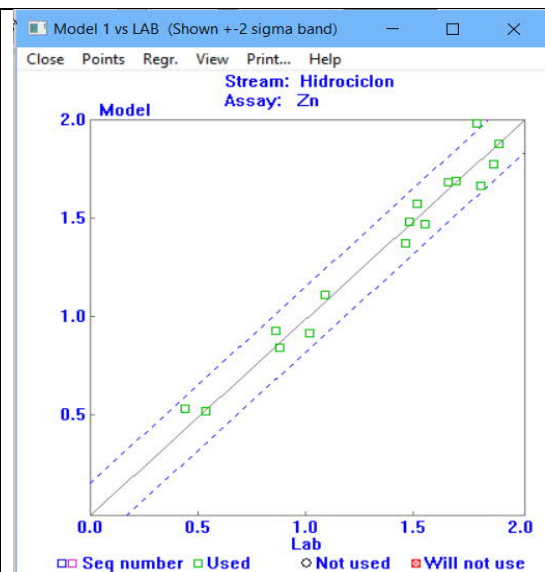


Figura 108. Gráfico de dispersión del modelo de calibración Zinc.

La Tabla 32 muestra la comparativa de los resultados estadísticos del modelo para el Zinc con muestras del periodo de cribas y el periodo de hidrociclones.

Tabla 32. Resultados estadísticos del modelo de calibración para Zinc		
	Cribas	Hidrociclones
Muestras	82	16
Coefficiente de correlación	0.9922	0.9848
Relativo Sigma	6.92%	6.25%
Absoluto Sigma	0.121	0.0839
Fvalor	1219	61.93
Máximo	4.77%	1.88%
Mínimo	0.41%	0.44%

La Ecuación 96 muestra el modelo de Zinc calculado para el periodo de cribas, la cual está en función de las intensidades de Zinc, Hierro, Sólidos y Plata Background donde el Coeficiente de correlación es 0.992.

$$\% Zn = -2.53 + Zn1.54x10^{-3} + Fex3.48x10^{-4} + Solx4.052x10^{-4} - AgBgx1.281x10^{-3}$$

Ecuación 96

La Ecuación 97 muestra el modelo de Zinc calculado para el periodo de hidrociclones, la cual está en función de las intensidades de Plomo, Zinc, hierro, Sólidos y Plata Background donde el Coeficiente de correlación es 0.984.

$$\% Zn = 0.683 - Pb * 1.09x10^{-3} + Znx1.31x10^{-3} + Fex8.649x10^{-4} + Solx1.16x10^{-3} - AgBgx4.56x10^{-3}$$

Ecuación 97

Después de elaborar los dos modelos de calibración para el Zinc utilizando las intensidades para determinar líneas de regresión de ambos modelos, la Figura 109 muestra la línea en

color azul que representa la con cribas y la línea de color roja con hidrociclones, donde se muestra que la pendiente de ambas que van paralelas porque el tamaño de partícula de la esfalerita es diferente.

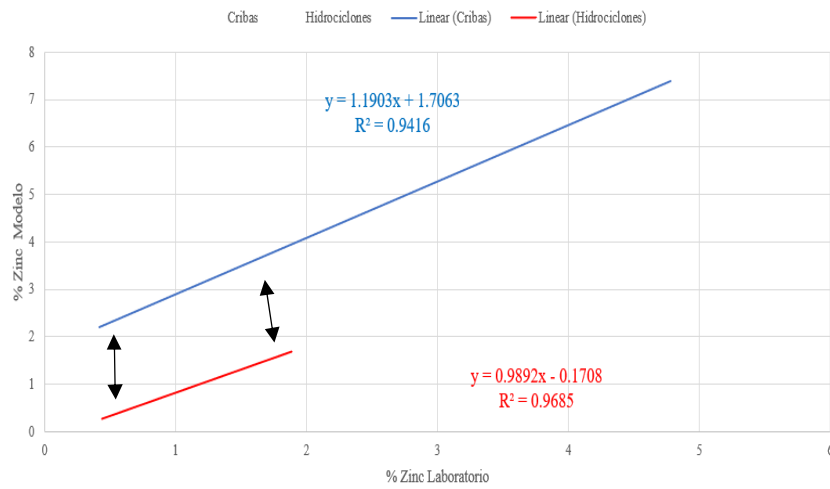


Figura 109. Gráfico de dispersión del Zinc con el modelo de cribas e hidrociclones.

### Puntos importantes

El comportamiento de los modelos multivariados Zinc nos muestra que las pendientes son paralelas con cribas e hidrociclones.

#### 4.8.5 Modelo multivariable para el Hierro

Para el Hierro con el periodo con Cribas, la Figura 110 muestra el modelo del Hierro calculado con el software Outocal, donde el coeficiente de correlación es 0.8972, la Figura 111 muestra el gráfico de dispersión donde muestra en el *eje x* el Hierro de laboratorio y en el *eje y* se muestra el modelo Hierro calculado con las intensidades del analizador Courier.

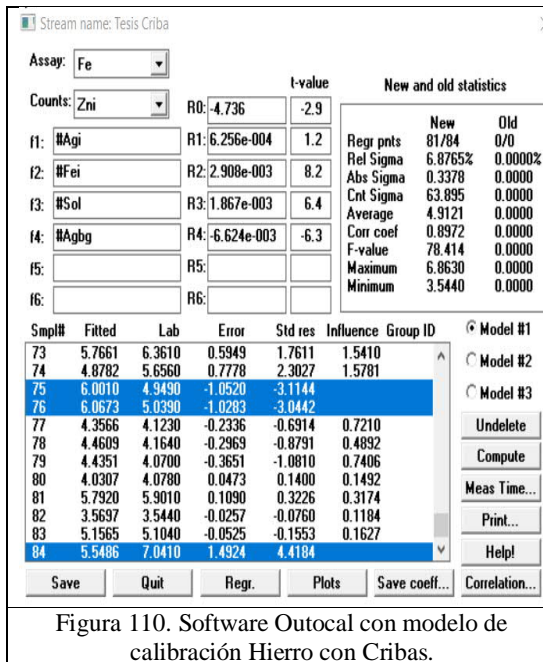


Figura 110. Software Outocal con modelo de calibración Hierro con Cribas.

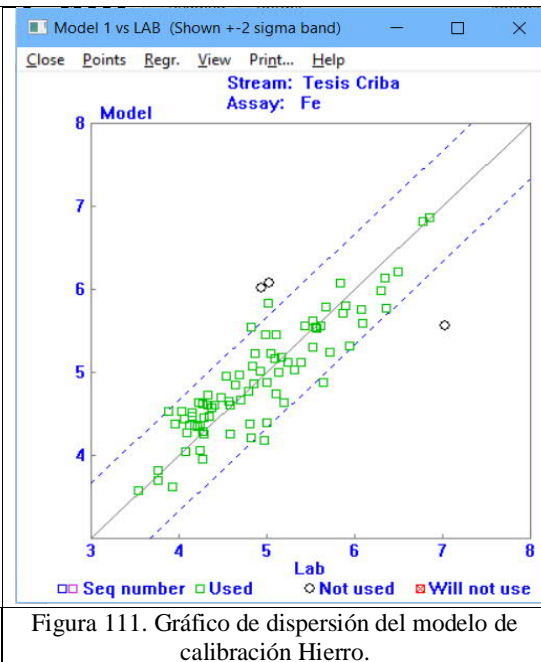


Figura 111. Gráfico de dispersión del modelo de calibración Hierro.

Para el Hierro con Hidrociclones, la Figura 112 muestra el modelo calculado con el software Outocal, donde el coeficiente de correlación es 0.8762, la Figura 113 muestra el gráfico de dispersión donde muestra en el *eje x* el porcentaje de hierro de laboratorio y en el *eje y* se muestra el modelo del porcentaje de hierro calculado con las intensidades del analizador Courier.



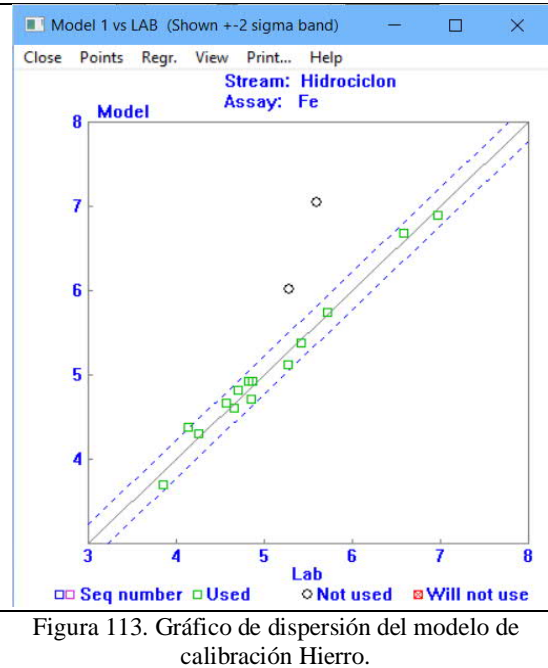
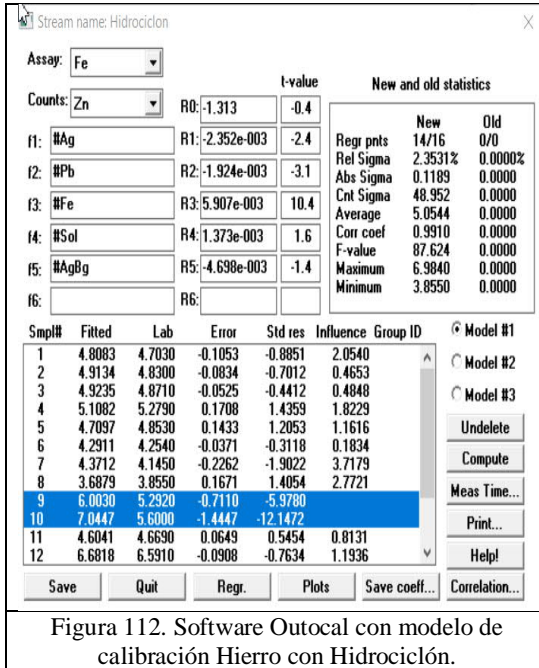


Figura 112. Software Outocal con modelo de calibración Hierro con Hidrociclón.

Figura 113. Gráfico de dispersión del modelo de calibración Hierro.

La Tabla 33 muestra la comparativa de los resultados estadísticos del modelo para el Hierro con muestras del periodo de cribas y el periodo de hidrociclones.

Tabla 33. Resultados estadísticos del modelo de calibración para Hierro		
	Cribas	Hidrociclones
Muestras	81	14
Coefficiente de correlación	0.8972	0.991
Relativo Sigma	6.87%	2.35%
Absoluto Sigma	0.337	0.118
Fvalor	78.41	87.62
Máximo	6.86	6.98
Mínimo	3.54	3.85

La Ecuación 98 muestra el modelo de Hierro calculado para el periodo de cribas, la cual está en función de las intensidades de Plata, Hierro, Sólidos y Plata Background, donde el Coeficiente de correlación es 0.8972.

$$\%Fe = -4.73 + Ag * 6.25 \times 10^{-4} + Fex2.9 \times 10^{-3} + Solx1.867 \times 10^{-3} - AgBgx6.6 \times 10^{-3}$$

Ecuación 98

La Ecuación 99 muestra el modelo de Hierro calculado para el periodo de hidrociclones, la cual está en función de las intensidades de Plata, Plomo, Hierro, Sólidos y Plata Background donde el Coeficiente de correlación es 0.991.

$$\%Fe = -1.31 - Agx2.35 \times 10^{-3} - Pbx1.92 \times 10^{-3} + Fe * 5.9 \times 10^{-3} + Solx1.37 \times 10^{-3} - AgBgx4.68 \times 10^{-3}$$

Ecuación 99

Después de elaborar los dos modelos de calibración para el Hierro utilizando las intensidades para determinar líneas de regresión de ambos modelos, la Figura 114 muestra la línea en color azul que representa al periodo con cribas y la línea de color roja el periodo con hidrociclones, donde se muestra que la pendiente de ambas van cercanamente porque el tamaño de partícula de la Hierro es diferente.

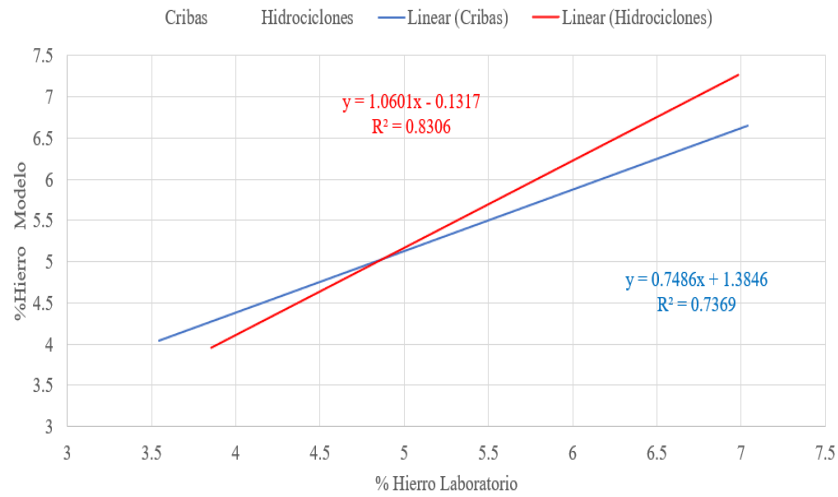


Figura 114. Gráfico de dispersión del Hierro con el modelo de cribas e hidrociclones.

#### 4.8.6 Modelo multivariable para el Sólido

Para los Sólidos con el periodo con Cribas, la Figura 115 muestra el modelo de los Sólidos calculado con el software Outocal, donde el coeficiente de correlación es 0.9597, la Figura 116 muestra el gráfico de dispersión donde se muestra en el *eje x* los Sólidos de laboratorio y en el *eje y* se muestra el modelo de los Sólidos calculado con las intensidades del analizador Courier.

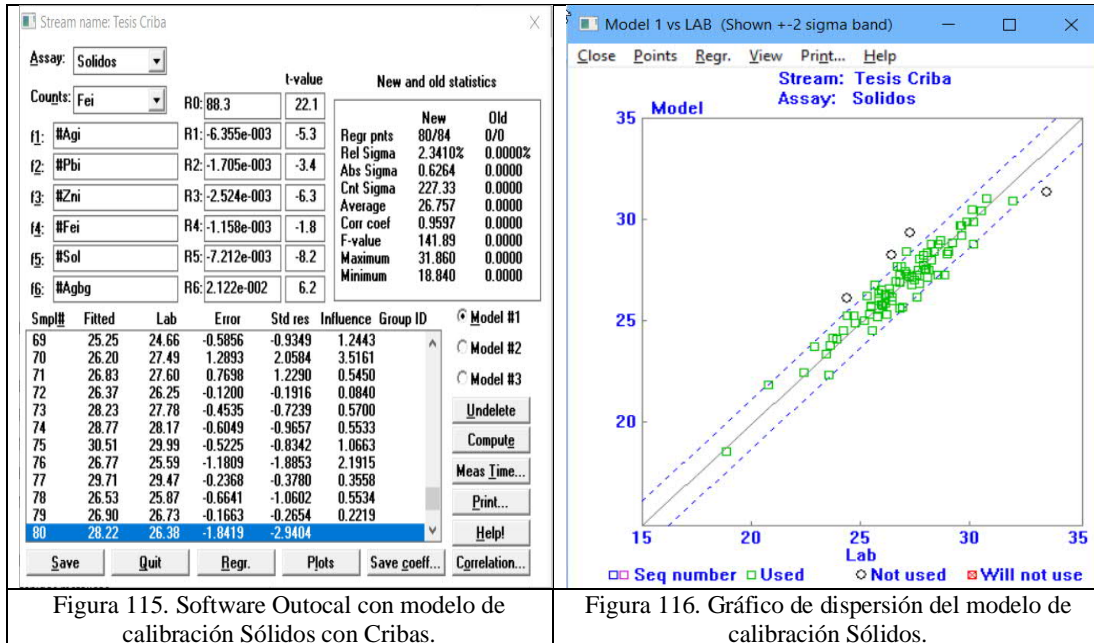


Figura 115. Software Outocal con modelo de calibración Sólidos con Cribas.

Figura 116. Gráfico de dispersión del modelo de calibración Sólidos.

Para los Sólidos con el periodo de Hidrociclones, la Figura 117 muestra el modelo calculado con el software Outocal, donde el coeficiente de correlación es 0.9819; la Figura 118, muestra el gráfico de dispersión donde el *eje x* corresponde el porcentaje de Sólidos de laboratorio y en el *eje y* se muestra el modelo del porcentaje de Sólidos calculado con las intensidades del analizador Courier.

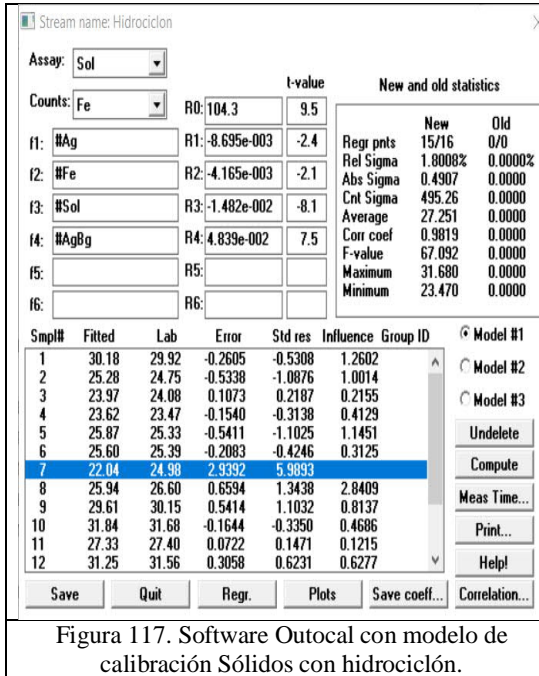


Figura 117. Software Outocal con modelo de calibración Sólidos con hidrociclón.

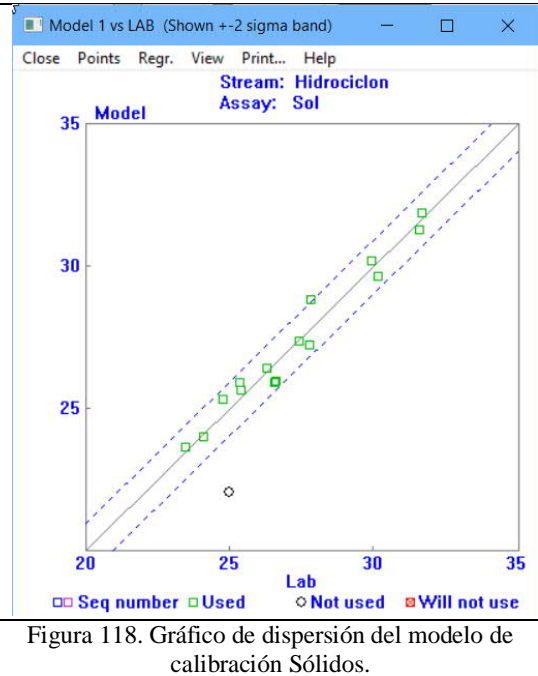


Figura 118. Gráfico de dispersión del modelo de calibración Sólidos.

La Tabla 34 muestra la comparativa de los resultados estadísticos del modelo para Sólidos con muestras del periodo de cribas y el periodo de hidrociclones.

	Cribas	Hidrociclones
Muestras	80	15
Coefficiente de correlación	0.9597	0.9819
Relativo Sigma	2.34	1.80
Absoluto Sigma	0.6264	0.49
Fvalor	141.89	67.09
Máximo	31.86	31.68
Mínimo	18.84	23.47

La Ecuación 100 muestra el modelo calculado para el periodo de cribas, el cual está en función de las intensidades de Plata, Plomo, Zinc, Hierro, Sólidos y Plata Background donde el Coeficiente de correlación es 0.9597.

$$\%Sol = 89.27 - Agx6.07x10^{-3} - Pbx1.67x10^{-3} - Znx2.465x10^{-3} - Fex1.421x10^{-3} - Solx7.554x10^{-3} + AgBgx2.237x10^{-2}$$

Ecuación 100

La Ecuación 101 muestra el modelo del porcentaje de Sólidos calculado para el periodo de hidrociclones, el cual está en función de las intensidades de Plata, hierro, Sólidos y Plata Background, donde el Coeficiente de correlación es 0.9819.

$$\%Sol = 104.3 - Ag \times 8.69x10^{-3} - Fe \times 4.1 \times 10^{-3} - Solx1.4 \times 10^{-2} + AgBgx4.83 \times 10^{-2}$$

Ecuación 101

Después de elaborar los dos modelos de calibración para los Sólidos utilizando las intensidades para determinar líneas de regresión de ambos modelos, la Figura 119 muestra la línea en color azul que representa el periodo con cribas y la línea de color roja el periodo con hidrociclones, donde se muestra que la pendiente de ambas van casi paralelas, porque el tamaño de partícula del sólido es diferente.

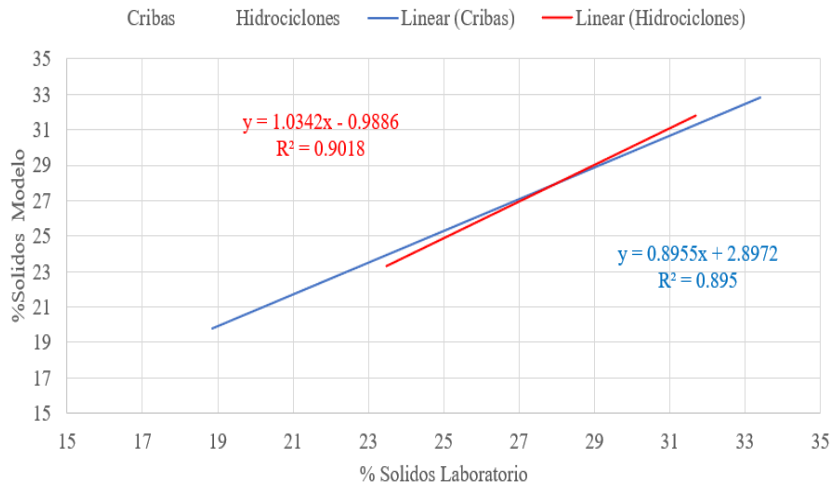


Figura 119. Gráfico de dispersión del Sólido con el modelo de cribas e hidrociclones.

Puntos importantes:

El objetivo del analizador de elementos en línea es medir intensidades de elementos Plomo Plata, Zinc Cobre Hierro y Sólidos y cuantificar cada uno de ellos.

En el analizador de elementos en línea Courier también se puede incluir una variable que determine el tamaño de partícula P80 en función de las intensidades.

Particularmente en la Plata y el Zinc se observa que la intensidad del elemento se incrementa cuando el tamaño de partícula es menor.

Las características de la galena durante el proceso de molienda es el elemento que es más fino por lo cual la intensidad no se ve afectada por el tamaño de partícula y el modelo multivariable es paralelo sin diferencias significativas.

Una vez evaluado el efecto del tamaño de las partículas en analizador de elementos en línea, a continuación, se evaluará la forma de las partículas.

#### 4.9 Evaluación de la forma de las partículas libres.

En esta sección analizaremos los resultados del programa análisis de imagen del microscopio, donde se determinará las longitudes máximas y mínimas y se determinará un diámetro aritmético y el diámetro de Sauter para identificar la forma en el periodo de Cribas o Hidrociclones.

Con la base de datos de la mineralogía de las partículas libres que se obtuvo de la microscopía óptica por turno, como lo muestra el gráfico de jerarquías marcadas en color verde la evaluación de la forma de las muestras provenientes del periodo de cribas e hidrociclones provenientes del proceso en línea, en este apartado se identificó la forma de las partículas con cribas e hidrociclones.

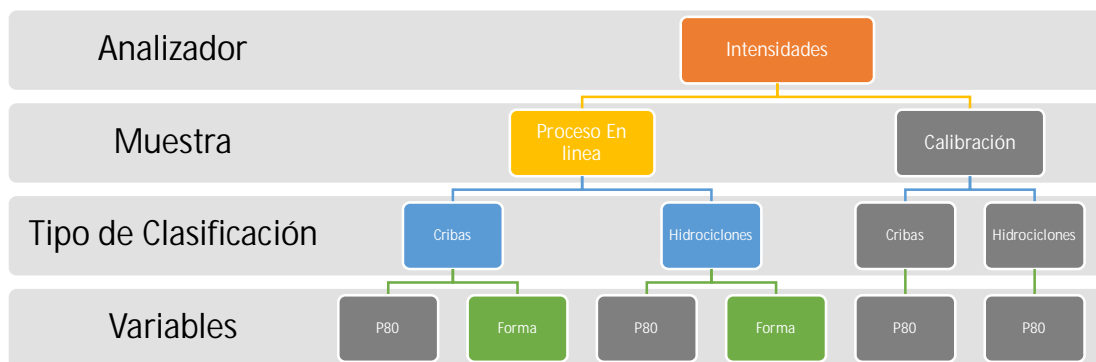


Figura 120 Procedimiento empleado para realizar pruebas estadísticas para evaluar la forma en los dos periodos de clasificación con Cribas e Hidrociclones.

En el conteo de partículas libres en la microscopía fue 10,884, donde la mayor cantidad de partículas de mineral fueron la Pirita, Esfalerita y Galena. La Tabla 35 muestra la distribución de partículas contadas.

Item	Clase	Nombre	Fórmula	Cantidad de Partículas
10	Py	Pirita	FeS <sub>2</sub>	5,220
11	Sp	Esfalerita	(Zn, Fe) S	2,351
5	Gn	Galena	PbS	2,068
12	Ccp	Calcopirita	CuFeS <sub>2</sub>	361
3	Apy	Arsenopirita	FeAsS	353
9	Pr	Proustita	Ag <sub>3</sub> AsS <sub>3</sub>	150
8	Po	Pirrotita	Fe <sub>(1-x)</sub> S	147
1	Ag	Plata	Ag	96
2	Ac	Acantita	Ag <sub>2</sub> S	28
4	Fe	Hierro	Fe	23
7	Pg	Pirargirita	Ag <sub>3</sub> SbS <sub>3</sub>	51
6	Mag	Magnetita	FeOFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36

En la Tabla 36 se muestra la media de la longitud máxima de las partículas durante el periodo con cribas y con hidrociclones, el propósito es identificar en qué periodo de clasificación se obtiene el menor tamaño por cada uno de los minerales.

	Clase	Nombre	Fórmula	Media de la Longitud máxima Con Cribas $\mu\text{m}$	Media de la Longitud máxima con Hidrociclones $\mu\text{m}$	Criterio de evaluación
1	Ag	Plata	Ag	138.704	812.766	cribas
2	Ac	Acantita	Ag <sub>2</sub> S	104.655	98.386	Hidrociclones
3	Apy	Arsenopirita	FeAsS	71.442	71.526	cribas
4	Fe	Hierro	Fe	106.683	62.906	Hidrociclones
5	Gn	Galena	PbS	54.618	44.556	Hidrociclones
6	Mag	Magnetita	FeOFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	150.678	No hay datos	No aplica
7	Pg	Pirargirita	Ag <sub>3</sub> SbS <sub>3</sub>	79.015	27.087	Hidrociclones
8	Po	Pirrotita	Fe <sub>(1-x)</sub> S	139.603	76.701	Hidrociclones
9	Pr	Proustita	Ag <sub>3</sub> AsS <sub>3</sub>	62.321	50.567	Hidrociclones
10	Py	Pirita	FeS <sub>2</sub>	58.270	53.152	Hidrociclones
11	Sp	Esfalerita	(Zn, Fe) S	66.787	69.484	cribas
12	Ccp	Calcopirita	CuFeS <sub>2</sub>	77.191	53.116	Hidrociclones

En la Tabla 37 se muestran la media de la longitud mínima (espesor) de las partículas durante el periodo 1 con cribas y el periodo 2 con hidrociclones por cada uno de los minerales.

	Clase	Nombre	Fórmula	Media de la Longitud mínima con cribas	Media de la Longitud mínima con hidrociclones	Criterio evaluación
1	Ag	Plata	Ag	48.70	86.78	Cribas
2	Ac	Acantita	Ag <sub>2</sub> S	65.28	82.30	Cribas
3	Apy	Arsenopirita	FeAsS	44.69	42.63	Hidrociclones
4	Fe	Hierro	Fe	40.89	26.64	Hidrociclones
5	Gn	Galena	PbS	35.45	29.70	Hidrociclones
6	Mag	Magnetita	FeOFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	86.17	No hay datos	No aplica
7	Pg	Pirargirita	Ag <sub>3</sub> SbS <sub>3</sub>	50.50	14.60	Hidrociclones
8	Po	Pirrotita	Fe <sub>(1-x)</sub> S	80.97	47.41	Hidrociclones
9	Pr	Proustita	Ag <sub>3</sub> AsS <sub>3</sub>	41.74	26.48	Hidrociclones
10	Py	Pirita	FeS <sub>2</sub>	36.10	28.90	Hidrociclones

11	Sp	Esfalerita	(Zn, Fe) S	39.94	38.99	Hidrociclones
12	Ccp	Calcopirita	CuFeS <sub>2</sub>	48.44	30.37	Hidrociclones

En la Tabla 38 se muestran la media de los diámetros de las partículas durante el periodo 1 con cribas y el periodo 2 con hidrociclones por cada uno de los minerales.

	Clase	Nombre	Fórmula	Media de Diámetro Aritmético con Cribas	Media de Diámetro Aritmético Hidrociclones	Criterio de evaluación
1	Ag	Plata	Ag	71.32	165.36	Cribas
2	Ac	Acantita	Ag <sub>2</sub> S	71.96	78.23	Cribas
3	Apy	Arsenopirita	FeAsS	51.25	49.76	Hidrociclones
4	Fe	Hierro	Fe	53.83	33.25	Hidrociclones
5	Gn	Galena	PbS	41.48	32.54	Hidrociclones
6	Mag	Magnetita	FeOFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	104.50	No hay datos	No aplica
7	Pg	Pirargirita	Ag <sub>3</sub> SbS <sub>3</sub>	56.15	18.98	Hidrociclones
8	Po	Pirrotita	Fe <sub>(1-x)</sub> S	95.27	52.41	Hidrociclones
9	Pr	Proustita	Ag <sub>3</sub> AsS <sub>3</sub>	49.30	33.12	Hidrociclones
10	Py	Pirita	FeS <sub>2</sub>	42.81	33.55	Hidrociclones
11	Sp	Esfalerita	(Zn, Fe) S	48.23	45.73	Hidrociclones
12	Ccp	Calcopirita	CuFeS <sub>2</sub>	55.41	35.36	Hidrociclones

En la Tabla 39 se muestran la media de los diámetros de Sauter de las partículas durante el periodo 1 con cribas y el periodo 2 con hidrociclones por cada uno de los minerales.

	Clase	Nombre	Fórmula	Media de Diámetro Sauter con Cribas	Media de Diámetro Sauter Hidrociclones	Criterio de evaluación
1	Ag	Plata	Ag	45.27	138.93	Cribas
2	Ac	Acantita	Ag <sub>2</sub> S	38.12	38.73	Cribas
3	Apy	Arsenopirita	FeAsS	30.03	30.39	Cribas
4	Fe	Hierro	Fe	38.53	26.27	Hidrociclones
5	Gn	Galena	PbS	24.63	21.80	Hidrociclones
6	Mag	Magnetita	FeOFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	49.97	No hay datos	No aplica
7	Pg	Pirargirita	Ag <sub>3</sub> SbS <sub>3</sub>	32.03	16.23	Hidrociclones
8	Po	Pirrotita	Fe <sub>(1-x)</sub> S	46.64	31.41	Hidrociclones
9	Pr	Proustita	Ag <sub>3</sub> AsS <sub>3</sub>	27.46	24.50	Hidrociclones
10	Py	Pirita	FeS <sub>2</sub>	20.92	24.31	Cribas
11	Sp	Esfalerita	(Zn, Fe) S	60.54	63.13	Cribas
12	Ccp	Calcopirita	CuFeS <sub>2</sub>	70.13	48.26	Hidrociclones



En la Tabla 40 se muestra la relación de Longitud máxima/Longitud mínima de las partículas durante el periodo 1 con cribas y el periodo 2 con hidrociclones para cada uno de los minerales.

	Clase	Nombre	Formula	Media de Longitud Max/Min con Cribas	Media de Longitud Max/Min Hidrociclones	Criterio de evaluación
1	Ag	Plata	Ag	2.85	9.37	Cribas
2	Ac	Acantita	Ag <sub>2</sub> S	1.60	1.20	Hidrociclones
3	Apy	Arsenopirita	FeAsS	1.60	1.68	Cribas
4	Fe	Hierro	Fe	2.61	2.36	Hidrociclones
5	Gn	Galena	PbS	1.54	1.50	Hidrociclones
6	Mag	Magnetita	FeOFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.75	No hay datos	No aplica
7	Pg	Pirargirita	Ag <sub>3</sub> SbS <sub>3</sub>	1.56	1.85	Cribas
8	Po	Pirrotita	Fe <sub>(1-x)</sub> S	1.72	1.62	Hidrociclones
9	Pr	Proustita	Ag <sub>3</sub> AsS <sub>3</sub>	1.49	1.91	Cribas
10	Py	Pirita	FeS <sub>2</sub>	1.61	1.84	Cribas
11	Sp	Esfalerita	(Zn, Fe) S	1.67	1.78	Cribas
12	Ccp	Calcopirita	CuFeS <sub>2</sub>	1.59	1.75	Cribas

En la Tabla 41 muestra como resumen, en qué sistema de clasificación la partícula de cada elemento es más fina. Comparando las cinco maneras en las que se midió la partícula de acuerdo a su morfología.

Las partículas libres tienden a ser más pequeñas con hidrociclones que con cribas por cada uno de los minerales, solo la pirita y la esfalerita tienen un diámetro mayor.

Tabla 41. Comparación de las partículas libres durante el periodo con clasificación de Cribas vs Hidrociclones.								
	Class	Nombre	Formula	Diámetro aritmético	Diámetro Sauter con hidrociclones	Longitud Máxima	Longitud Mínima	Longitud Máxima /Longitud mínima
1	Ag	Plata	Ag	cribas	cribas	cribas	cribas	cribas
2	Ac	Acantita	Ag <sub>2</sub> S	cribas	cribas	Hidrociclones	cribas	Hidrociclones
3	Apy	Arsenopirita	FeAsS	Hidrociclones	cribas	cribas	Hidrociclones	cribas
4	Fe	Hierro	Fe	Hidrociclones	Hidrociclones	Hidrociclones	Hidrociclones	Hidrociclones
5	Gn	Galena	PbS	Hidrociclones	Hidrociclones	Hidrociclones	Hidrociclones	Hidrociclones
6	Mag	Magnetita	FeOFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	No existe muestra comparativa				
7	Pg	Pirargirita	Ag <sub>3</sub> SbS <sub>3</sub>	Hidrociclones	Hidrociclones	Hidrociclones	Hidrociclones	cribas
8	Po	Pirrotita	Fe <sub>(1-x)</sub> S	Hidrociclones	Hidrociclones	Hidrociclones	Hidrociclones	Hidrociclones
9	Pr	Proustita	Ag <sub>3</sub> AsS <sub>3</sub>	Hidrociclones	Hidrociclones	Hidrociclones	Hidrociclones	cribas
10	Py	Pirita	FeS <sub>2</sub>	Hidrociclones	cribas	Hidrociclones	Hidrociclones	cribas
11	Sp	Esfalerita	(Zn, Fe) S	Hidrociclones	cribas	cribas	Hidrociclones	cribas
12	Ccp	Calcopirita	CuFeS <sub>2</sub>	Hidrociclones	Hidrociclones	Hidrociclones	Hidrociclones	cribas

#### Puntos importantes:

Al observar al microscopio y procesar la información en el software, se obtuvieron los factores de forma de las partículas como de Área, perímetro, longitud máxima, espesor; y con estos, se determinó el diámetro de Sauter; a partir de esta información, concluimos que los resultados de menor tamaño de partícula ocurren con hidrociclones, por lo tanto la forma de las partículas tienden a ser diferentes.

A continuación, se evaluará la distribución de la forma de las partículas de los minerales Galena, Pirita, Esfalerita.

#### 4.10 Evaluación de redondez y esfericidad de partículas

En la sección anterior identificamos las longitudes y diámetros de los minerales en los periodos de cribas e hidrociclones para los minerales, por lo que en esta sección compararemos el diámetro de Sauter vs la relación de longitud máxima entre la longitud mínima de cada mineral, se busca identificar la forma de las partículas es redonda o prismática.

##### 4.10.1 Galena con cribas

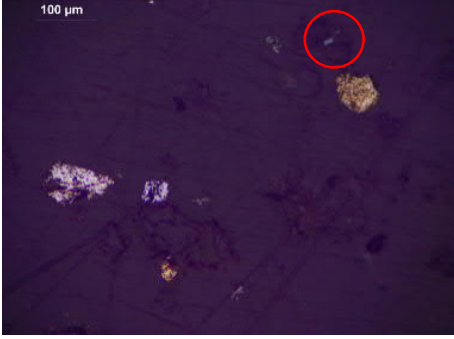


A partir del diámetro de Sauter, con la relación longitud máxima entre longitud mínima, se clasifica la forma de las partículas. Si la relación de longitud máxima entre la mínima es menor a 3 se puede decir que la partícula tiende a ser cilíndrica y esférica con un diámetro de Sauter menor a 40 micrómetros.

La Tabla 42 muestra el resultado de la clasificación de la galena en el periodo de cribas donde se identifica la distribución de diámetros de Sauter vs la relación longitud máxima entre longitud mínima, enmarcado en rojo se muestran las partículas 80.87% que son menores de 40  $\mu$  y la relación de longitud máxima entre longitud mínima es menor a 3, entonces esta proporción de partículas son cilíndricas o esféricas.

En color verde se indica que hubo una mayor cantidad de partículas en esos rangos. En color amarillo se indica que hubo una cantidad menor de partículas en esos rangos. En color rojo se indica que no hubo partículas en esos rangos.

		Tabla 42 Clasificación de Galena con cribas							
		Diámetro Sauter (micrómetros) Galena con Cribas							
		10	20	30	40	50	60	70	Total
Relación Longitud Max/Longitud min	7	0.0%	0.1%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	<b>0.1%</b>
	6	0.1%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	<b>0.1%</b>
	5	0.1%	0.00%	0.1%	0.1%	0.00%	0.05%	0.1%	<b>0.3%</b>
	4	0.3%	0.21%	0.4%	0.1%	0.00%	0.05%	0.1%	<b>1.1%</b>
	3	1.4%	2.17%	1.2%	0.9%	0.3%	0.00%	0.2%	<b>6.1%</b>
	2	11.2%	15.9%	9.5%	5.3%	1.6%	0.6%	0.4%	<b>44.4%</b>
	1	11.7%	17.1%	10.7%	5.6%	1.7%	0.8%	0.5%	<b>48.0%</b>
Total		<b>24.7%</b>	<b>35.4%</b>	<b>21.9%</b>	<b>11.9%</b>	<b>3.6%</b>	<b>1.4%</b>	<b>1.2%</b>	

La Tabla 43 muestra imágenes de la Galena donde se tiene del diámetro de Sauter de  $10\mu\text{m}$  y  $70\mu\text{m}$  relacionadas con el cociente de longitud máxima entre longitud mínima de 1 y 6, donde se busca identificar ópticamente las diferencias de formas de las partículas.

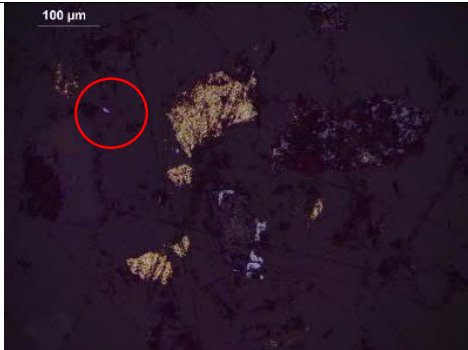
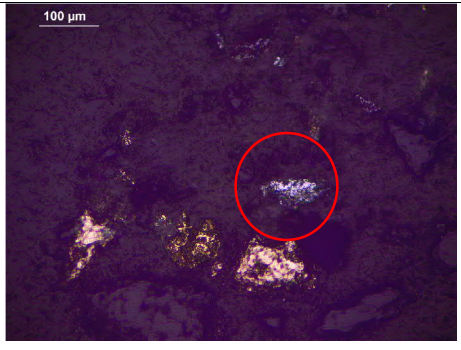
Tabla 43 Imágenes de Galena con cribas			
Diámetro de Sauter $D_{(3,2)}$ (micrómetros) Galena Con Cribas			
		10 $\mu\text{m}$	70 $\mu\text{m}$
Relación Longitud Máxima/Longitud mínima	6	 <p>Figura 121 No.2277-3 Galena <math>D_{(3,2)}</math> 10<math>\mu\text{m}</math> R-Lmax/Lmin 6</p>	
	1	 <p>Figura 122 No. 388-04 Galena <math>D_{(3,2)}</math> 10<math>\mu\text{m}</math> R-Lmax/Lmin 1</p>	 <p>Figura 123 378-05 Galena <math>D_{(3,2)}</math> 70<math>\mu\text{m}</math> R-Lmax/Lmin 1</p>

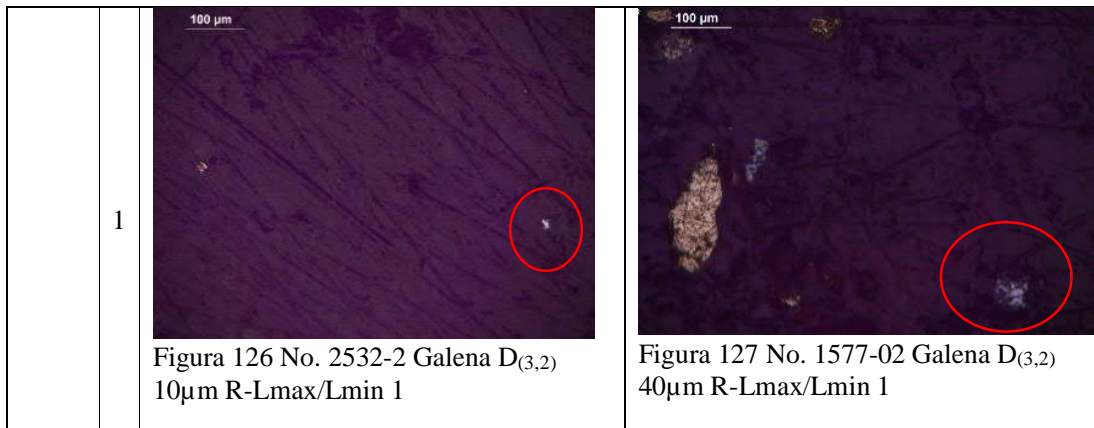
#### 4.10.2 Galena con hidrociclones

La Tabla 44 muestra el resultado de la clasificación de la galena en el periodo de hidrociclones donde se identifica la distribución de diámetros de Sauter (Semsari Parapari, Parian et al. 2020) vs la relación longitud máxima entre longitud mínima, enmarcado en rojo se muestran las partículas 88.35% son menores de  $40\ \mu$  y la relación de longitud máxima entre longitud mínima es menor a 3 entonces esta proporción de partículas son cilíndricas o esféricas.

		Tabla 44 Clasificación de Galena con Hidrociclones							
		Diámetro Sauter Galena con Hidrociclones							
		10	20	30	40	50	60	70	Total
Relación Longitud Max/Longitud min	7	0.0%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	<b>0.0%</b>
	6	0.0%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	<b>0.0%</b>
	5	0.0%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	<b>0.0%</b>
	4	0.0%	1.55%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	<b>1.6%</b>
	3	1.6%	1.55%	1.6%	0.8%	0.00%	0.00%	0.00%	<b>5.4%</b>
	2	7.8%	17.1%	8.5%	3.1%	0.0%	0.8%	0.0%	<b>37.2%</b>
	1	17.1%	19.4%	14.0%	4.7%	0.8%	0.0%	0.0%	<b>55.8%</b>
Total		<b>26.4%</b>	<b>39.5%</b>	<b>24.0%</b>	<b>8.5%</b>	<b>0.8%</b>	<b>0.8%</b>	<b>0.0%</b>	

La Tabla 45 muestra imágenes de la galena donde se tiene del diámetro de Sauter de  $10\ \mu\text{m}$  y  $40\ \mu\text{m}$  relacionadas con el cociente de la longitud máxima entre longitud mínima de 1 y 3, donde se busca identificar ópticamente las diferencias de formas de las partículas.

		Tabla 45 Imágenes de Galena con Hidrociclones	
		Diámetro de Sauter (micrómetros) Galena Con Hidrociclones	
		10 $\mu\text{m}$	40 $\mu\text{m}$
Relación Longitud Máxima/Longitud mínima	3	 <p>Figura 124 No. 1726-1 Galena <math>D_{(3,2)}</math> 10<math>\mu\text{m}</math> R-Lmax/Lmin 3</p>	 <p>Figura 125 No. 2504-4 Galena <math>D_{(3,2)}</math> 40<math>\mu\text{m}</math> R-Lmax/Lmin 3</p>
	1		



#### Puntos importantes




Se hizo la comparación utilizando cribas e hidrociclones, donde el diámetro de Sauter de las partículas de galena es menor a 40µm y la relación de longitud máxima entre la mínima es menor a 4, la suma de estas partículas acumuladas con cribas que se encuentran en el rango mencionado es de 80.87 %, y con hidrociclones las partículas acumuladas fueron de 88.35%; lo anterior nos indica que la forma de las partículas con hidrociclones es más cilíndrica y esférica que con cribas.

#### 4.10.3 Esfalerita con cribas

La Tabla 46 muestra el resultado de la clasificación de la esfalerita en el periodo de cribas donde se identifica la distribución de diámetros de Sauter vs la relación longitud máxima entre longitud mínima, enmarcado en rojo se muestran las partículas que son menores de 40µ y corresponden al 14.31%, y la relación de longitud máxima entre longitud mínima es menor a 3, entonces esta proporción de partículas son cilíndricas o esféricas.

		Tabla 46 Clasificación de Esfalerita con Cribas							
		Diámetro Sauter Esfalerita con Cribas							
		10	20	30	40	50	60	70	Total
Relación Longitud Max/Longitud min	7	4.9%	0.46%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	5.3%
	6	1.6%	1.42%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	3.1%
	5	0.9%	3.29%	0.23%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	4.4%
	4	0.7%	5.07%	2.65%	0.09%	0.00%	0.00%	0.00%	8.5%
	3	0.4%	2.97%	7.04%	2.65%	0.32%	0.05%	0.05%	13.4%
	2	0.0%	0.6%	3.2%	6.8%	7.7%	3.9%	1.6%	23.8%
	1	0.0%	0.0%	0.1%	0.5%	2.5%	4.6%	33.7%	41.4%
Total		8.5%	13.8%	13.3%	10.1%	10.5%	8.5%	35.4%	

La Tabla 47 muestra imágenes de la esfalerita donde se tiene del diámetro de Sauter de  $10\mu\text{m}$  y  $70\mu\text{m}$  relacionadas con el cociente de la longitud máxima entre longitud mínima de 2 y 7, donde se busca identificar ópticamente las diferencias de formas de las partículas.


Tabla 47 Imágenes de Esfalerita con cribas			
Diámetro de Sauter (micrómetros) Esfalerita con Cribas			
		20 $\mu\text{m}$	70 $\mu\text{m}$
Relación Longitud Máxima/Longitud mínima	7	 <p>Figura 128 No. TS408 3 Esfalerita <math>D_{(3,2)}</math> 20<math>\mu\text{m}</math> R-Lmax/Lmin 7</p>	
	2	 <p>Figura 129 No. TS979-01 Esfalerita <math>D_{(3,2)}</math> 20<math>\mu\text{m}</math> R-Lmax/Lmin 2</p>	 <p>Figura 130 No. 423-05 Esfalerita <math>D_{(3,2)}</math> 70<math>\mu\text{m}</math> R-Lmax/Lmin 2</p>

#### 4.10.4 Esfalerita con hidrociclones

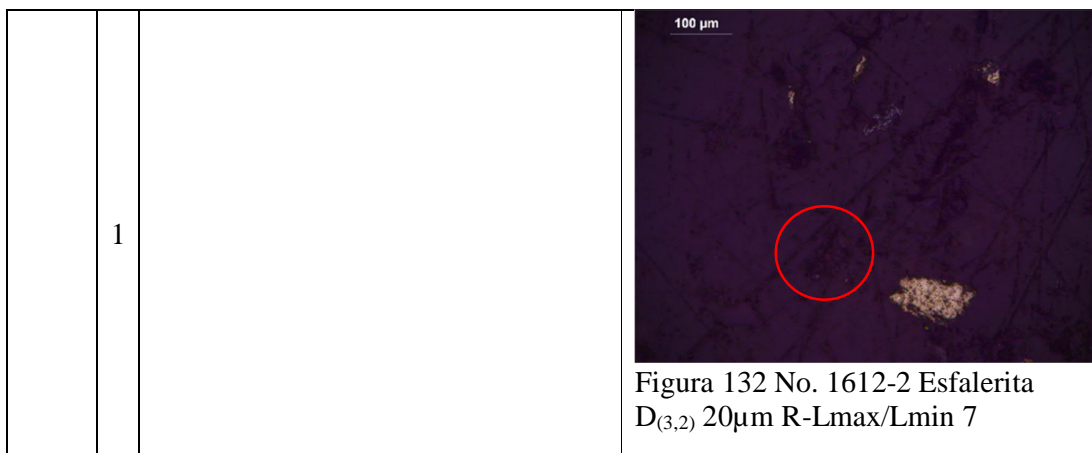
La Tabla 48 muestra el resultado de la clasificación de la esfalerita en el periodo de hidrociclones donde se identifica la distribución de diámetros de Sauter vs la relación longitud máxima entre longitud mínima, enmarcado en rojo se muestran las partículas 14.6% son menores de 40  $\mu$  y la relación de longitud máxima entre longitud mínima es menor a 3 entonces esta proporción de partículas son cilíndricas o esféricas.

		Tabla 48 Clasificación de Esfalerita con Hidrociclones.							
		Diámetro Sauter Esfalerita con Hidrociclones							
		10	20	30	40	50	60	70	Total
Relación Longitud Max/Longitud min	7	3.7%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	3.7%
	6	1.2%	0.62%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.9%
	5	0.0%	5.56%	0.62%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	6.2%
	4	0.0%	4.32%	1.23%	0.62%	0.00%	0.00%	0.00%	6.2%
	3	0.0%	1.85%	11.11%	4.94%	1.23%	0.00%	0.00%	19.1%
	2	0.0%	0.0%	1.2%	6.8%	6.2%	1.9%	1.2%	17.3%
	1	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.9%	6.2%	37.7%	45.7%
Total		4.9%	12.3%	14.2%	12.3%	9.3%	8.0%	38.9%	

La Tabla 49 muestra imágenes de la esfalerita donde se tiene del diámetro de Sauter de 10 $\mu$ m y 70 $\mu$ m relacionadas con el cociente de longitud máxima entre longitud mínima de 2 y 7, donde se busca identificar ópticamente las diferencias de formas de las partículas.

		Tabla 49 Imágenes de Esfalerita con hidrociclones	
		Diámetro de Sauter (micrómetros) Esfalerita con Hidrociclones	
		10	70
Relación Longitud Máxima/Longitud mínima	7		
		Figura 131 No. 1768-1 Esfalerita $D_{(3,2)} 20\mu\text{m}$ R-Lmax/Lmin 7	





#### Puntos importantes




Se hizo la comparación utilizando cribas e hidrociclones, donde el diámetro de Sauter de las partículas de esfalerita es menor a  $40\mu\text{m}$  y la relación de longitud máxima entre la mínima es menor a 4, la suma de estas partículas acumuladas con cribas que se encuentran en el rango mencionado es de 14.31 % y con hidrociclones las partículas acumuladas fueron de 14.6%, lo cual nos indica que la forma de las partículas con hidrociclones es más cilíndrica y esférica que con cribas. Adicional las partículas de Esfalerita son de diámetro mayor que la Galena.

#### 4.10.5 Pirita con cribas

La Tabla 50 muestra el resultado de la clasificación de la pirita en el periodo de cribas donde se identifica la distribución de diámetros de Sauter vs la relación longitud máxima entre longitud mínima, enmarcado en rojo se muestran las partículas 72.67% son menores de  $40\mu\text{m}$  y la relación de longitud máxima entre longitud mínima es menor a 3, entonces esta proporción de partículas son cilíndricas o esféricas.

		Tabla 50 Clasificación de Pirita con cribas							
		Diámetro Sauter Pirita con Cribas							
		10	20	30	40	50	60	70	Total
Relación Longitud Max/Longitud	7	1.83%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.8%
	6	0.11%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.1%
	5	1.79%	0.04%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.8%
	4	2.68%	0.40%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	3.1%
	3	2.56%	3.90%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	6.5%
	2	0.72%	14.75%	13.55%	6.88%	3.52%	1.34%	0.64%	41.4%
	1	11.21%	15.58%	10.38%	4.94%	1.94%	0.68%	0.53%	45.3%
Total		20.9%	34.7%	24.0%	11.8%	5.5%	2.0%	1.2%	

La Tabla 51 muestra imágenes de la pirita donde se tiene del diámetro de Sauter de  $10\mu\text{m}$  y  $70\mu\text{m}$  relacionadas con la relación de longitud máxima entre longitud mínima de 2 y 7 donde se busca identificar ópticamente las diferencias de formas de las partículas.



		Tabla 51 Imágenes de Pirita con cribas	
		Diámetro de Sauter (micrómetros) Pirita Con Cribas	
		10	70
Relación Longitud Máxima/Longitud mínima	7	 <p>Figura 133 No. 448-05 Pirita <math>D_{(3,2)}</math> <math>20\mu\text{m}</math> R-Lmax/Lmin 10</p>	
	1	 <p>Figura 134 No. 378-3 Pirita <math>D_{(3,2)}</math> <math>20\mu\text{m}</math> R-Lmax/Lmin 1</p>	 <p>Figura 135 No. 463-4 Pirita <math>D_{(3,2)}</math> <math>70\mu\text{m}</math> R-Lmax/Lmin 7</p>

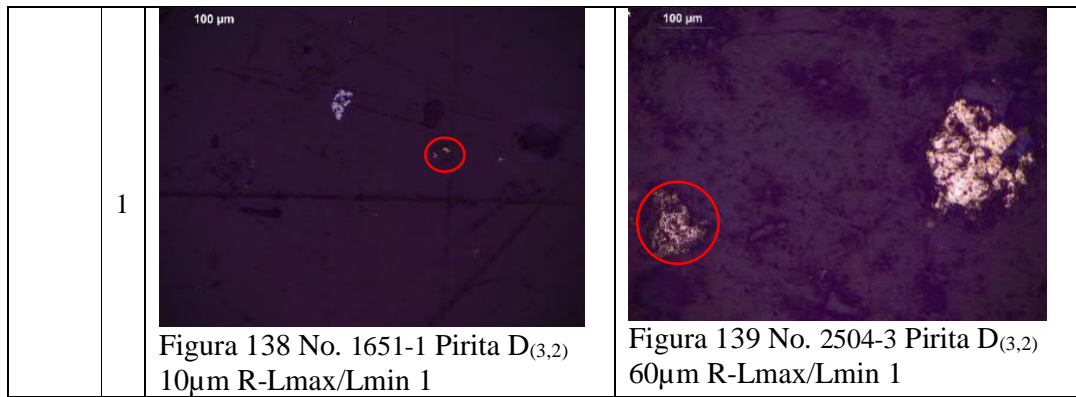
#### 4.10.6 Pirita con hidrociclones

La Tabla 52 muestra el resultado de la clasificación de la pirita en el periodo de hidrociclones donde se identifica la distribución de diámetros de Sauter vs la relación longitud máxima entre longitud mínima, enmarcado en rojo se muestran las partículas 72.67% son menores de 40  $\mu\text{m}$ , y la relación de longitud máxima entre longitud mínima es menor a 3, entonces en esta proporción las partículas tienden a ser cilíndricas o esféricas.

		Tabla 52 Clasificación de Pirita con Hidrociclones							
		Diámetro Sauter Pirita con Hidrociclones							
		10	20	30	40	50	60	70	Total
Relación Longitud Max/Longitud	7	4.17%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	4.2%
	6	0.19%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.2%
	5	3.23%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	3.2%
	4	3.98%	0.19%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	4.2%
	3	2.85%	7.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	9.9%
	2	0.19%	16.70%	15.18%	4.93%	3.23%	1.33%	0.57%	42.1%
	1	11.39%	14.42%	7.21%	1.90%	0.95%	0.38%	0.00%	36.2%
Total		26.0%	38.3%	22.4%	6.8%	4.2%	1.7%	0.6%	

La Tabla 53 muestra imágenes de la pirita donde se tiene del diámetro de Sauter de 10  $\mu\text{m}$  y 60  $\mu\text{m}$  relacionadas con la relación de longitud máxima entre longitud mínima de 2 y 7 donde se busca identificar ópticamente las diferencias de formas de las partículas.

		Tabla 53 Imágenes de Pirita con Hidrociclones	
		Diámetro de Sauter (micrómetros) Pirita con Hidrociclones	
		10	60
Relación Longitud Máxima/Longitud	7		
		Figura 136 No. 1598-2 Pirita $D_{(3,2)}$ 10 $\mu\text{m}$ R-Lmax/Lmin 7	Figura 137 No. 1775-2 Pirita $D_{(3,2)}$ 60 $\mu\text{m}$ R-Lmax/Lmin 7



### Resumen

La Tabla 54 muestra el resumen para comparar los diámetros de Sauter contra la relación de longitud máxima entre la longitud mínima, cuando la relación es de 1 a 3 se define como una partícula redonda. Para valores de 4 a 7 se define a las partículas como prismáticas. Los diámetros de Sauter considerados en la tabla son partículas menores a 40 micrómetros.

La clasificación con cribas nos indica que las partículas de pirita y esfalerita son de forma prismática

La galena y la pirita presentan partículas más redondas que la esfalerita con clasificación hidrociclones, la esfalerita con clasificación hidrociclones son redondeadas con diámetro de Sauter mayor.

	Relación Longitud Max/Longitud min	Diámetro Sauter Cribas <40 $\mu$	Diámetro Sauter Hidrociclones <40 $\mu$
Galena	De 4 a 7	1.31%	1.55%
	De 1 a 3	80.87%	88.65%
Esfalerita	De 4 a 7	12.57 %	17.25 %
	De 1 a 3	22.73%	14.16%
Pirita	De 4 a 7	6.85%	11.76 %
	De 1 a 3	72.67%	74.96 %

### Puntos importantes

Se hizo la comparación utilizando cribas e hidrociclones, donde el diámetro de Sauter de las partículas de pirita es menor a 40 $\mu$ m y la relación de longitud máxima entre la mínima es menor a 4, la suma de estas partículas acumuladas con cribas de la pirita que se encuentran en el rango mencionado es de 72.67 %, y con hidrociclones las partículas acumuladas fueron

de 74.96%, lo cual nos indica que la forma de las partículas con hidrociclones es más cilíndrica y esférica que con cribas.

Al analizar las imágenes de las partículas podemos identificar visualmente las formas y se puede validar los resultados analizados en las evaluaciones 8 y 9.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DE TRABAJO A FUTURO**

Basados en la hipótesis planteada en el presente trabajo, se concluye que tamaño de partícula P80 tiene un efecto directamente proporcional a las intensidades de fluorescencia de rayos X del analizador de elementos en línea.

En la operación normal de una Planta Concentradora estable, en su proceso de molienda, los cambios de tamaño de partícula son pequeños y por lo tanto su efecto en la medición del analizador de elementos en línea puede tener una variación mínima, a menos que exista un cambio en el proceso, el cual modifique los tamaños de partícula.

El presente trabajo concluye que el tamaño de partícula P80 es importante y puede tener un efecto positivo en los resultados del Courier, la aportación práctica de la aplicación en este estudio, nos lleva a identificar, desarrollar y explotar el potencial de la aplicación del analizador de elementos en línea, basándonos en la influencia de la variación del tamaño de partícula en la precisión de los resultados ensayados en tiempo real.

Cuando el tamaño de partícula disminuye, la liberación de las partículas aumenta, a su vez la intensidad de fluorescencia del elemento incrementa.

La teoría indica que, al haber más partículas para medir con un tamaño de partícula más pequeño, la intensidad debería aumentar. Con base en los resultados de los análisis estadísticos y gráficos de dispersión presentados anteriormente, comprobamos que cuando las partículas son más pequeñas, la intensidad aumenta. En el caso de los canales de Plomo hubo un incremento hasta el 28%, en el Zinc disminuye hasta el 23% cuando las partículas son más gruesas y para el Hierro disminuye hasta un 8.04%.

Con base en las características del analizador de elementos en línea Courier, se puede correlacionar el tamaño de partícula P80 contra las intensidades.

Con base en el análisis estadístico que se realizó en el presente trabajo, para obtener mediciones del analizador Courier más exactas contra las que se realizan en el laboratorio, es posible obtener un modelo multivariable de calibración del tamaño de partícula P80 con las intensidades, y también es posible conocer cómo influye de manera positiva o negativa en el resultado, cuando la granulometría se incrementa o disminuya.

Las partículas de Pirita y Esfalerita tienen una gravedad específica menor que las partículas de Galena y Acanthita, por lo que, al trabajar con un hidrociclón, estas salen del circuito de molienda más fácilmente con menor tamaño, el resultado de esto es obtener partículas más gruesas con formas no esféricas.

La otra variable que debe influir son las características asociativas de los minerales, que pueden revelar una caracterización mineralógica, alterando los resultados de las intensidades del analizador de elementos en línea, pero esta sería tema de otra investigación.

## **RECOMENDACIONES A FUTURO**

Al analizar el comportamiento del tamaño de partícula, se observa un área de oportunidad para mejorar la confiabilidad en el análisis de elementos en línea, por lo cual se recomienda que al tomar las muestras para calibración se pueda también llevar a la práctica analizar el tamaño de partícula P80, con el fin de comprender la variación en los resultados de los ensayos entregados por el analizador de elementos en línea con respecto a los obtenidos en laboratorio.

Cuando se presenten cambios del proceso de tecnologías de clasificación, se deberá analizar por separado cada una de ellas, para que, de esta manera, sea posible identificar el impacto que pueden tener cada una en el desempeño o rendimiento de la operación.

Un sistema de analizador de elementos en línea Courier es confiable para la medición en tiempo real, debido al gran potencial que tiene en los procesos de concentración metalúrgica, es una tecnología que resulta muy práctica, rápida y que puede alcanzar buena precisión y exactitud, al ser posible identificar las variaciones del proceso, una calibración previa de las variables requeridas a medir contribuye notablemente a incrementar la confiabilidad de los resultados obtenidos.

## REFERENCIAS

- 
- <sup>i</sup> Metso Outotec, From ore to metals: Metso Outotec offers complete solution to recover precious & base metals from cengiz mazidagi disponible en <https://www.mogroup.com/insights/case-studies/mining-and-metals/from-ore-to-metals-metso-outotec-offers-complete-solution-to-recover-precious--base-metals-from-cengiz-mazidagi/>., consultado el 18 de Agosto 2022.
- <sup>ii</sup> Fresnillo PLC, Mina en operación Saucito disponible en <http://www.fresnilloplc.com/que-hacemos/minas-en-operacion/saucito/>., consultado el 7 de Junio de 2022.
- <sup>iii</sup> Bernstein F., (1961) Application of x-ray fluorescence Análisis to process control. *Advances in x-ray analysis. Volume 5: Tenth annual conference on applications of x-ray analysis, august 7-9: 486 - 499.*
- <sup>iv</sup> Vilches V. (2020) Análisis de lecturas del analizador courier para aumentar la confiabilidad de las mediciones en la planta concentradora minera centinela. Proyecto de título. Instituto profesional IACC, Escuela de procesos Industriales, Santiago de Chile, Chile. 37 pp.
- <sup>v</sup> Gaspar E. (2013) Proyecto para el incremento de capacidad de operación de la planta de beneficio, compañía minera la negra. Tesis de licenciatur. Universidad Nacional Autónoma de México-Maconí, Querétaro. 114 pp.
- <sup>vi</sup> Bermúdez P., de la Cruz C., Fernández C., (1961) Aplicación a la determinación de uranio en minerales. Junta de energía nuclear - Madrid, España. 20 pp.
- <sup>vii</sup> Rawle, D. A. (2003) The basic principles of particle size analysis. *Surface coatings international part a: coatings journal.* 58-65 pp.
- <sup>viii</sup> Outokumpu technology. Manual de operación courier 6 y courier 5. 48 pp.
- <sup>ix</sup> Outokumpu Technology. Manual de calibración de pulpa Courier. 79 pp.
- <sup>x</sup> Krebs Engineers. Manual de funcionamiento y mantenimiento hidrociclones. 52 pp.
- <sup>xi</sup> Lynch A.J., Rao T.C., Nageswararao K. (1975) Influence of feed inlet diameter on the hydrocyclone behaviour. *Research paper, international journal of mineral processing volume 3, issue 4.* 357-363 pp.
- <sup>xii</sup> Derrick Corporation, 2008. Manual de funcionamiento y mantenimiento cribas. 118 pp.
- <sup>xiii</sup> Krumbein W., C. (1941). Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. *Journal of sedimentary research.* 64–72 pp.
- <sup>xiv</sup> Power, M.C. (1982) Comparison chart for estimating roundness and sphericity. American Geological Institute. 18 pp.