



**Universidad Autónoma de San Luis Potosí**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Centro de Investigación y Estudios de Posgrado**

**“CORRELACIÓN DEL EFECTO DE LA MATERIA CARBONOSA EN  
LA RECUPERACIÓN METALÚRGICA DE PLOMO-ZINC Y  
SUBORDINADOS, PARA UNA MENA DISEMINADA DE UN  
YACIMIENTO TIPO *STOCKWORK* EN FUNCIÓN DEL IMPACTO  
HIDROTERMAL”**

**T E S I S**

Que para obtener el grado de:

**MAESTRO EN INGENIERÍA DE MINERALES**

Presenta:

Ing. Gerardo Daniel García Sánchez

Asesor:

Dr. Roel Cruz Gaona

Co-asesor:

Dr. Juan Luis Reyes Bahena

Beca CONACYT numero: 1007657



San Luis Potosí, S. L. P.

Febrero, 2022



**Universidad Autónoma de San Luis Potosí**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Centro de Investigación y Estudios de Posgrado**

**“CORRELACIÓN DEL EFECTO DE LA MATERIA CARBONOSA EN  
LA RECUPERACIÓN METALÚRGICA DE PLOMO-ZINC Y  
SUBORDINADOS, PARA UNA MENA DISEMINADA DE UN  
YACIMIENTO TIPO *STOCKWORK* EN FUNCIÓN DEL IMPACTO  
HIDROTHERMAL”**

Presenta:

Ing. Gerardo Daniel García Sánchez

Sinodales:

Dr. Roel Cruz Gaona

\_\_\_\_\_

Dr. Juan Luis Reyes Bahena

\_\_\_\_\_

Dr. Cristóbal Alberto Pérez Alonso

\_\_\_\_\_

Dr. Macario Rocha Rocha

\_\_\_\_\_

Dra. María Guadalupe Sánchez Loredo

\_\_\_\_\_

Suplente:

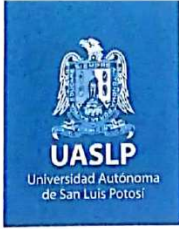
Dr. Iván Alejandro Reyes Domínguez

\_\_\_\_\_



San Luis Potosí, S. L. P.

Febrero, 2022



FACULTAD DE  
INGENIERÍA

16 de diciembre de 2021

**ING. GERARDO DANIEL GARCÍA SÁNCHEZ  
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Roel Cruz Gaona y Juan Luis Reyes Bahena**, 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 diciembre del presente año, fue aprobado el Temario propuesto:

**TEMARIO:**

**"CORRELACIÓN DEL EFECTO DE LA MATERIA CARBONOSA EN LA RECUPERACIÓN METALÚRGICA DE PLOMO-ZINC Y SUBORDINADOS, PARA UNA MENA DISEMINADA DE UN YACIMIENTO TIPO STOCKWORK EN FUNCIÓN DEL IMPACTO HIDROTHERMAL"**

1. Introducción.
  2. Antecedentes de la geología del carbón y su efecto en la flotación de sulfuros
  3. Metodología para la caracterización y efecto de la materia carbonosa en la flotación de sulfuros
  4. Resultados del efecto de la materia carbonosa en la recuperación plomo-zinc
  5. Conclusiones
- Referencias

**"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"**

**A T E N T A M E N T E**

**DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN**  
DIRECTOR  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE SAN LUIS POTOSÍ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCION

[www.uaslp.mx](http://www.uaslp.mx)

Av. Manuel Nava 8  
Zona Universitaria • CP 78290  
San Luis Potosí, S.L.P.  
tel. (444) 826.2330 al 39  
fax (444) 826.2336

Copia. Archivo.  
\*etn



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 828-23-06  
San Luis Potosí, S.L.P. México



El que suscribe Ing. Gerardo Daniel García Sánchez,  
con domicilio en Blas Escontría, 807-a  
Colonia / fraccionamiento Soledad de Graciano Sánchez,  
C.P. 78430 Tel. 4444906855 Ciudad Soledad de Graciano Sánchez  
S.L.P. y en mi carácter de autor y titular de la tesis que  
lleva como nombre: **CORRELACIÓN DEL EFECTO DE LA MATERIA CARBONOSA EN LA RECUPERACIÓN METALÚRGICA DE PLOMO-ZINC  
Y SUBORDINADOS, PARA UNA MENA DESEMENADA DE UN YACIMIENTO TIPO  
STOCKWORKS EN FUNCIÓN DEL IMPACTO HIDROTHERMAL** 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 08 de FEBRERO de 2022

Atentamente,

FIRMA  
AUTOR





*La vida premia a quien se atreve a hacer lo extraordinario.*

# **Dedicatoria**

**A Dios que me ha dado vida para llegar hasta aquí.**

**A mis padres María del Socorro y Raymundo, que sin su amor, apoyo y confianza me hubiera sido muy difícil lograr lo que hoy tengo y soy.**

**A mis hermanos Omar, Oscar, Carolina, Mayra, Juan y Diana; a todos mis amigos, especialmente Juanjo, Raulito, Doctor Miguel y Adonái; a todos mis profesores especialmente al M.C. Marco Rojas. Todos ustedes son especiales para mí porque siempre han estado para escucharme, darme aliento y fortaleza ante todas las situaciones que he enfrentado.**

**A.G.Z., Por tu invaluable compañía, cariño y apoyarme en esta etapa de mi vida, así como a sus padres que me han hecho sentir como un hijo más.**

**Les dedico este trabajo que honradamente he hecho.**

# Agradecimientos

Agradezco al Instituto de Metalurgia de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, por brindarme la oportunidad de poder desarrollar este proyecto en sus laboratorios y adquirir conocimiento en sus aulas, así como al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por brindarme apoyo económico de manutención en el transcurso del desarrollo de este proyecto.

Mi gratitud a mis asesores de tesis, Dr. Roel Cruz Gaona, Dr. Juan Luis Reyes Bahena y con mucho cariño a la M.C. Carmen Ojeda, por su profesionalismo al escucharme y orientarme en el desarrollo de este trabajo; de igual manera al Dr. Aldo Amir y a la empresa Newmont, por aportar las muestras minerales y las facilidades en los análisis químicos; también a mis sinodales Dr. Cristóbal Alberto Pérez Alonso, Dr. Macario Rocha Rocha y a la Dra. María Guadalupe Sánchez Loredo por sus consejos y correcciones que fueron muy útiles al pulir y concretar esta tesis; y finalmente, no menos importante, a mis profesores Dr. Iván, Dr. Aragón, Dr. Donato, M.C. Carmen Ojeda, Dr. Cristóbal, Dr. Gilberto, Dr. Delgadillo, Dr. José Juan, por sus conocimientos que compartieron con un servidor.

Fueron los encargados de los laboratorios, L.Q. Izanami López Acosta y su equipo Ing. Laura e Ing. Carlos; M.I.M.M. José Manuel Martínez, M.I.M. Francisco Galindo y la M.I.M.M. Rosa Lina Tovar, quienes me ayudaron y orientaron en los procesos experimentales, de análisis y caracterización para lograr los resultados presentados en esta tesis; a Jenny y a Nayeli, por su amabilidad y disposición para con un servidor y a mis compañeros de generación Juan José, Benito y Elvira por su compañerismo y amistad. Sin el apoyo de todos ustedes, esto no hubiera sido posible, Muchas gracias.

# ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS .....	viii
RESUMEN .....	x
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. JUSTIFICACIÓN .....	4
1.2. HIPÓTESIS.....	5
1.3. OBJETIVO .....	5
1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	5
2. ANTECEDENTES DE LA GEOLOGÍA DEL CARBÓN Y SU EFECTO EN LA FLOTACIÓN DE SULFUROS .....	7
2.1. GEOMETALURGIA .....	7
2.2. GEOLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	8
2.2.1. Zona de estudio (Localización y Vías de acceso).....	8
2.2.2. Geología Regional. ....	9
2.2.3. Estratigrafía.....	10
2.2.4. Yacimientos Minerales. ....	12
2.2.5. Alteración Hidrotermal. ....	15
2.3. GEOLOGÍA DEL CARBÓN.....	16
2.3.1. Descripción del carbón. ....	16
2.3.2. Grupos y tipos de macerales. ....	19
2.3.3. Petrografía del carbón. ....	21
2.4. EFECTOS DEL CARBÓN EN LA RECUPERACIÓN DE SULFUROS POR FLOTACIÓN .....	23
2.4.1. Flotación de minerales.....	23
2.4.2. Métodos y reactivos utilizados para el tratamiento del carbón en la flotación de sulfuros y su respuesta metalúrgica .....	27
3. METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN Y EFECTO DE LA MATERIA CARBONOSA EN LA FLOTACIÓN DE SULFUROS.....	29
3.1. RECEPCIÓN DE MUESTRAS DE ESTUDIO .....	30

---

3.2.	PREPARACIÓN DE MUESTRAS .....	31
3.3.	ESTABLECIMIENTO DE COMPÓSITOS .....	33
3.4.	METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA .....	34
3.4.1.	Láminas petrográficas .....	34
3.4.2.	Análisis químicos .....	35
3.4.3.	Difracción de rayos X .....	36
3.4.4.	Microscopía electrónica de barrido .....	37
3.5.	SELECCIÓN DE PROPIEDADES GEOLÓGICAS .....	37
3.6.	PRUEBAS METALÚRGICAS .....	38
3.6.1.	Granulometría de cabeza .....	38
3.6.2.	Cinética de molienda .....	39
3.6.3.	Pruebas de flotación .....	40
3.7.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE CORRELACIÓN .....	47
3.7.1.	Identificación de variables dependientes e independientes .....	47
3.7.2.	Covarianza entre variables .....	48
3.7.3.	Correlación de Pearson .....	48
3.7.4.	Regresión lineal múltiple .....	49
4.	RESULTADOS DEL EFECTO DE LA MATERIA CARBONOSA EN LA RECUPERACIÓN DE PLOMO-ZINC .....	51
4.1.	CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA .....	51
4.1.1.	Descripción petrográfica de las muestras .....	51
4.1.2.	Identificación de minerales opacos mediante mineragrafía .....	56
4.1.3.	Análisis químico de los compósitos minerales .....	59
4.1.4.	Identificación de especies minerales y semicuantificación mediante DRX .....	60
4.1.5.	Mapeo y microanálisis mediante MEB .....	63
4.2.	DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES GEOLÓGICAS .....	70
4.2.1.	Determinación de carbonatos .....	71
4.2.2.	Alteración filica .....	73
4.2.3.	Contenido de Carbono orgánico total .....	74
4.3.	RESPUESTA METALÚRGICA .....	75
4.3.1.	Granulometría de cabeza .....	75
4.3.2.	Cálculo de tiempo de molienda .....	75
4.3.3.	Evaluación de la recuperación en flotación Pb-Zn .....	78

4.4.	Modelamiento matemático de las respuestas metalúrgicas.....	91
4.4.1.	Selección de variables independientes.....	91
4.4.2.	Selección de variables dependientes.....	91
4.4.3.	Modelo matemático propuesto aplicado para molienda.....	92
4.4.4.	Modelos matemáticos para predecir recuperación de plomo.....	95
5.	CONCLUSIONES.....	106
	REFERENCIAS.....	109
	ANEXOS .....	a
	APÉNDICE I. CÁLCULO DE TIEMPO DE MOLIENDA .....	a
	APÉNDICE II. BALANCES METALÚRGICOS .....	k
	APÉNDICE III. MÉTODO DE REMOCIÓN FÍSICA DE MATERIA CARBONOSA .....	n
	APÉNDICE IV. ESTADÍSTICA .....	o



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localización. ....	8
Figura 2. Mapa de provincias geológicas (Ortega-Gutiérrez, 1991). La estrella amarilla representa el lugar de la zona de estudio en la provincia geológica Cinturón Mexicano de Pliegues y Fallas. ....	9
Figura 3. Modelo geométrico de las brechas Peñasco y Azul (Rocha, 2016). ....	13
Figura 4. Sección geológica del yacimiento mineral Peñasquito (Rocha-Rocha, 2016). ....	14
Figura 5. Esquema representativo de la conversión de feldespato potásico en sericita y cuarzo. 16	
Figura 6. Macerales en microscopía óptica de transmisión (Gómez et al., 2007) ....	19
Figura 7. Descripción de macerales observados en microscopía óptica (Gómez et al, 2007). ....	21
Figura 8. Diagrama exhibiendo el ángulo de contacto de litotipos del carbón (Horsley-Smith, 1951) ....	25
Figura 9. Influencia del porcentaje de contaminación con carbón en los índices tecnológicos (recuperación) del proceso de flotación de plomo con contenido variable de xantato (Tomado de Liz, 1992).....	26
Figura 10. Diagrama de flujo mostrando una celda de pre-flotación de cobre (tomado de Schwarze, 2017).....	27
Figura 11. Diagrama de flujo representativo de la metodología experimental aplicada. ....	29
Figura 12. Representación de la zona del tajo de donde procedieron las muestras utilizadas en el presente trabajo. ....	30
Figura 13. Celda de flotación Denver de la marca METSO. ....	41
Figura 14. Diagrama de flujo de una flotación plomo-zinc sin remoción previa de carbón.....	41
Figura 15. Diagrama de flujo de una flotación plomo-zinc con remoción fisicoquímica del carbón.....	42
Figura 16. Diagrama de flujo de una flotación plomo-zinc con remoción física del carbón.....	43
Figura 17. Representación gráfica tridimensional de un plano que representa un modelo multivariado. ....	50
Figura 18. Fotomicrografía tomada a microscopio óptico de luz transmitida a una lámina delgada para describir la litología de las muestras. ....	52
Figura 19. Fotomicrografía tomada de una vetilla de la muestra ACO, en un microscopio óptico de luz transmitida.....	53
Figura 20. Fotomicrografía tomada a la muestra BCO observadas en sección delgada en un microscopio óptico de luz transmitida. ....	55

Figura 21. A la izquierda se muestra una fotomicrografía de una vetilla de la muestra ACO en un microscopio con luz transmitida. A la derecha se muestra la misma zona analizada, utilizando luz reflejada.....	57
Figura 22. Fotomicrografía de la muestra ACO observada en un microscopio con luz transmitida. A la derecha se muestra la misma zona analizada, utilizando luz reflejada. ....	57
Figura 23. A la izquierda se muestra una fotomicrografía de una vena de la muestra BCO con luz transmitida, a la derecha se muestra la misma zona con luz reflejada.....	58
Figura 24. Fotomicrografía de una pirita masiva.....	59
Figura 25. Difractograma de la muestra ACO. ....	61
Figura 26. Difractograma muestra BCO.....	62
Figura 27. Fotomicrografía obtenida en MEB por electrones retro dispersados donde el espectro 7 identifica una zona enriquecida de carbono.....	64
Figura 28. Fotomicrografía de un barrido de la muestra ACO obtenida en MEB, identifica feldespato potásico por el espectro 14. ....	64
Figura 29. Fotomicrografía de un barrido de la muestra ACO obtenida en MEB, identificando calcita por el espectro 15.....	65
Figura 30. Fotomicrografía obtenida en MEB, identificando cuarzo por el espectro 24.....	65
Figura 31. Fotomicrografía de un barrido de la muestra ACO obtenida en MEB, identificando pirita por el espectro 16.....	66
Figura 32. Fotomicrografía obtenida por MEB, identificando galena por el espectro 26. ....	66
Figura 33. Fotomicrografía en donde se identifica esfalerita y horizontes enriquecidos de pirita. ....	66
Figura 34. Fotomicrografía de un barrido de la muestra BCO obtenida en MEB, identificando fluorita por el espectro 2. ....	67
Figura 35. Fotomicrografía de una partícula de Sulfosal Argentotennantita identificada por el espectro 33. ....	68
Figura 36. Fotomicrografías de la muestra ACO, donde se muestran las asociaciones entre minerales de valor y ganga. ....	68
Figura 37. Fotomicrografías de la muestra BCO, donde se muestran las asociaciones de los minerales de valor y ganga. ....	69
Figura 38. Cristal de calcita localizada en una drusa de la muestra BCO. ....	71
Figura 39. Curvas granulométricas de los compósitos, después de la reducción de tamaño con la quebradora de cono. ....	75
Figura 40. Gráfica del comportamiento del acumulado negativo de la malla 120, respecto al y tiempo de molienda en cada uno de los compósitos minerales. ....	77

Figura 41. Gráfica donde muestra el tiempo exacto de molienda de cada uno de los compósitos para obtener P80 de 125 $\mu\text{m}$ . .....	78
Figura 42. Recuperación de especies de valor en concentrado de plomo en circuito de flotación SR, respecto a contenido de carbono orgánico. ....	79
Figura 43. Recuperación de especies de valor en concentrado de zinc en flotación SR respecto a contenido de carbono orgánico. ....	80
Figura 44. Recuperación de especies de valor en colas en una flotación sin remoción respecto a contenido de carbono orgánico. ....	81
Figura 45. Recuperación de especies de valor en concentrado de carbón de flotación con RFQ. ....	82
Figura 46. Recuperación de especies de valor en concentrado de plomo en la flotación con RFQ de carbón. ....	83
Figura 47. Recuperación de especies de valor en concentrado de zinc en la flotación con RFQ de carbón. ....	83
Figura 48. Recuperación de especies de valor en colas de la flotación con RFQ de carbón. ....	84
Figura 49. Recuperación de especies de valor en concentrado de carbón de una flotación con RF. ....	85
Figura 50. Recuperación de especies de valor en concentrado de plomo en una flotación con RF de carbón. ....	86
Figura 51. Recuperación de especies de valor en concentrado de zinc en una flotación con RF de carbón. ....	87
Figura 52. Recuperación de especies de valor en colas en una flotación con RF de carbón. ....	87
Figura 53. Comparativa de las recuperaciones de plomo-zinc en concentrado de plomo de flotación SR, con RFQ y RF de carbón. ....	89
Figura 54. Comparativa de las recuperaciones de plomo-zinc en concentrado de zinc de flotación SR, con RFQ y RF de carbón. ....	90
Figura 55. Relación de porcentaje de carbonato de calcio respecto al tiempo de molienda. ....	93
Figura 56. Gráfica de recuperación de plomo en función del porcentaje de minerales de alteración en la flotación plomo-zinc ST. ....	96
Figura 57. Gráfica de recuperación de plomo en función del contenido del porcentaje de carbono orgánico en la flotación plomo-zinc ST. ....	97
Figura 58. Representación tridimensional del plano que representa el modelo matemático multivariado para la flotación plomo-zinc ST. ....	98
Figura 59. Gráfica de recuperación plomo en función del porcentaje de minerales de alteración en la flotación plomo-zinc con RFQ. ....	99
Figura 60. Gráfica de recuperación de plomo en función del contenido del porcentaje de carbono orgánico en la flotación plomo-zinc con RFQ. ....	100

Figura 61. Gráfica de recuperación plomo en función del porcentaje de minerales de alteración en la flotación plomo-zinc con RF..... 101

Figura 62. Gráfica de recuperación de plomo en función del contenido del porcentaje de carbono orgánico en la flotación plomo-zinc con RF..... 102

Figura 63. Representación tridimensional del plano que representa el modelo matemático multivariado para la flotación plomo-zinc con RF. .... 103

Figura 64. Comparativa de recuperaciones utilizando el método interpolación por IDW, el cual muestra el comportamiento de la recuperación del plomo respecto a los métodos de remoción utilizados. .... 105

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de análisis solicitados a la empresa de las muestras originales.....	30
Tabla 2. Peso total de las muestras. ....	31
Tabla 3. Peso de las muestras utilizadas para elaborar láminas delgadas.....	31
Tabla 4. Porcentaje de pérdida de las muestras en la etapa de trituración en quebradora de quijada.....	32
Tabla 5. Proporciones y peso de las muestras originales para formar los compósitos. ....	33
Tabla 6. Proporciones establecidas de las muestras para formar los compósitos minerales. ....	34
Tabla 7. Mallas seleccionadas para realizar el análisis granulométrico .....	38
Tabla 8. Distribución de tamaño de bolas utilizadas en la cinética de molienda.....	39
Tabla 9. Reactivos utilizados en la flotación plomo-zinc y su descripción. ....	43
Tabla 10. Cuadro de reactivos utilizados para etapa primario de plomo.....	44
Tabla 11. Cuadro de reactivos utilizados para etapa agotativo de plomo.....	44
Tabla 12. Cuadro de reactivos utilizados para etapa primario de zinc. ....	45
Tabla 13. Cuadro de reactivos utilizados para etapa agotativo de zinc. ....	45
Tabla 14. Cuadro de reactivos utilizados para etapa pre-flotación de carbón en la flotación con RFQ.....	46
Tabla 15. Descripción y porcentajes de minerales observados en microscopio petrográfico de la muestra ACO. ....	54
Tabla 16. Descripción y porcentaje observados en el microscopio petrográfico de la muestra BCO. ....	56
Tabla 17. Leyes de cabeza de los compósitos establecidos (% en peso).....	59
Tabla 18. Minerales detectados por difracción de rayos X de la muestra ACO.....	61
Tabla 19. Minerales detectados en difracción de rayos X de la muestra BCO.....	62
Tabla 20. Porcentaje de calcita en cada uno de los compósitos establecidos. ....	72
Tabla 21. Parámetro de alteración en la roca en relación al porcentaje de la relación CSP. ....	73
Tabla 22. Porcentaje de minerales respecto a la relación CSP observados mediante petrografía en cada uno de los compósitos.....	74
Tabla 23. Porcentaje de carbono orgánico contenido en cada uno de los compósitos. ....	74
Tabla 24. Porcentaje de partículas que pasan a través de la malla 120 (125 $\mu\text{m}$ ) a los tiempos 0, 5, 10 y 15 minutos de molienda de cada uno de los compósitos. ....	76
Tabla 25. Funciones polinomiales del comportamiento del p80 en función del lapso de tiempo de 0-15 minutos. ....	77

Tabla 26. Tiempo necesario de molienda para obtener un P80 de 125 $\mu\text{m}$ de cada uno de los compósitos. ....	78
Tabla 27. Recuperaciones de especies de valor en cada uno de los concentrados obtenidos en la flotación SR de carbón. ....	79
Tabla 28. Recuperaciones de especies de valor en cada uno de los concentrados obtenidos en la flotación con RFQ de carbón. ....	81
Tabla 29. Recuperaciones de especies de valor en cada uno de los concentrados obtenidos en la flotación con RF de carbón. ....	85
Tabla 30. Parámetros correspondientes a las variables geológicas y su distribución en los compositos. ....	91
Tabla 31. Tiempo de molienda necesario para cada uno de los compósitos minerales. ....	91
Tabla 32. Recuperaciones de los concentrados plomo y zinc en la flotación SR. ....	92
Tabla 33. Recuperaciones de los concentrados plomo en la flotación RFQ. ....	92
Tabla 34. Recuperaciones de los concentrados plomo y zinc en la flotación RF. ....	92
Tabla 35. Validación de modelos matemáticos aplicados para calcular el tiempo de molienda. .	94
Tabla 36. Modelos matemáticos elaborados para predecir la recuperación de plomo en un rango de contenido de materia carbonosa de 0.04% a 0.34% y modelos matemáticos a partir del contenido de minerales de alteración. ....	103
Tabla 37. Modelos matemáticos multivariados en donde $x_1$ representa el porcentaje de minerales de alteración en la muestra y $x_2$ el porcentaje de materia carbonosa. ....	104



---

## RESUMEN

---

La materia carbonosa se comporta como un agente perjudicial en el proceso de flotación y lixiviación de minerales. Actualmente son utilizadas distintas técnicas para atenuar los efectos que éste contaminante produce en el beneficio de metales de valor, en los que se considera la depresión o pre-flotación de la materia carbonosa.

En el presente estudio utilizamos dos muestras procedentes del tajo Chile Colorado de la Unidad Minera Peñasquito, localizada al noreste del estado de Zacatecas; la primera presenta abundante materia carbonosa y la segunda una alteración filica moderada a pervasiva, con las cuales preparamos compósitos intermedios para representar la variabilidad mineralógica que pudiera existir en campo, buscando identificar las tendencias en el comportamiento metalúrgico en la etapa de molienda y flotación, específicamente en la recuperación de especies minerales de valor plomo-zinc.

Para llevar a cabo lo anteriormente descrito, las muestras fueron caracterizadas mediante microscopía electrónica de barrido, microscopía óptica y difracción de rayos X, en conjunto con análisis químicos, para identificar el contenido, las especies, variabilidad, disposición y arreglos mineralógicos de ambas muestras. Posteriormente una cinética de molienda fue realizada para determinar el tiempo al cual se obtiene un  $P_{80} \sim 120 \mu\text{m}$ , con el cual se llevó a cabo una serie de flotaciones para evaluar el efecto en la recuperación de metales de valor, sin remoción de materia carbonosa y con remoción física y fisicoquímica de la misma.

Los resultados indicaron que la cantidad de materia carbonosa y el porcentaje de minerales de alteración hidrotermal (filica) en las muestras presenta una relación inversa. Por su parte, la materia carbonosa disminuye la recuperación de especies de valor al evitar la acción de los reactivos de flotación, principalmente espumante y colectores. La utilización de métodos de remoción de materia carbonosa de la celda de flotación fue efectiva, al retirar con uno de ellos aproximadamente el 0.15% de materia carbonosa, lo cual se vió reflejado en la recuperación de plomo que va del 14 % al no utilizar remoción, al 64 % de recuperación de plomo al utilizar remoción.

Finalmente, el tratamiento estadístico de los datos de flotación, en función del contenido de materia carbonosa y alteración hidrotermal, permitió establecer modelos matemáticos para predecir el comportamiento de la mena y disminuir el impacto e incertidumbre al variar las condiciones geológicas del yacimiento *stockwork* con mineralización diseminada

---

# 1. INTRODUCCIÓN

---

Un yacimiento mineral es una concentración de minerales que pueden ser económicamente rentables y que generalmente fueron originados por procesos geotectónicos como actividad magmática y ascendientes, entre otros. Estos recursos naturales, como la mayoría, son consecuencia de procesos que concentran o enriquecen en elementos químicos deseables en cantidades que hacen económicamente factible su extracción (Tarbuck y Lutgens, 2005).

Los metales en una mena ocurren como una fase mineral que necesita ser procesada para ser liberados y formar concentrados con valor económico, es decir, bajo costo de recuperación. Los minerales económicos más típicos son los sulfuros de cobre, plomo, zinc, entre otros, que pueden estar físicamente ligados entre sí y con minerales sin valor económico denominados ganga, como cuarzo o calcita (Oyarzun *et al.*, 2011) fluorita, silicatos, arcillas, entre otros, dependiendo la naturaleza y su historia geológica.

Algunos yacimientos minerales metálicos fueron alojados o encajonados en rocas sedimentarias donde con el paso del tiempo pudieron ser deformados o metamorfoseados conteniendo materia orgánica, bitumen e incluso grafito (Parnell, 1993).

La materia carbonosa está presente en buena parte de los yacimientos polimetálicos de Pb-Zn. En general, la materia orgánica jugó un papel fundamental en la formación de ocurrencias y depósitos minerales, debido a que ésta puede funcionar como agente reductor, motivando la precipitación de iones metálicos transportados por los fluidos hidrotermales. La materia carbonosa por su naturaleza hidrofóbica afecta a los minerales económicos en el proceso de concentración por flotación en donde reduce la calidad de los concentrados, obstruye el paso del agua en los

filtros, adsorbe el oro en el proceso de lixiviación (Liz, 1992), altera condiciones de espuma, afecta la cinética de flotación de los sulfuros y crea dilución en la calidad del concentrado final (Smith, 2008).

Debido a las dificultades técnicas para el aislamiento y la investigación del material carbonoso que acompaña a las menas de plomo y zinc, éste ha sido poco estudiado y no existe suficiente información en la literatura sobre sus características. Este problema es recurrente y algunas empresas contrarrestan los efectos negativos del carbón realizando pre-flotaciones para limpiar una considerable cantidad de este agente o sacrifican grandes cantidades de reactivos principalmente colectores (Liz, 1992).

La geometalurgia es una disciplina encargada de predecir la respuesta metalúrgica de un yacimiento mineral al cuantificar la variabilidad mineral y los parámetros del proceso metalúrgico, tales como dureza, cinética de flotación y cinética de lixiviación. La reducción del impacto e incertidumbre al momento del procesamiento, principalmente en depósitos altamente variables y varios depósitos minerales cercanos que estén siendo minados juntos, es la principal aportación de esta actividad que poco a poco es aplicada a nivel mundial. La optimización y la resolución de problemas metalúrgicos a causa del desconocimiento de la variación de especies minerales y contaminantes en las reservas, es de suma importancia en la actualidad para los proyectos mineros (SGS Mineral Service, 2007).

Las muestras utilizadas para el presente trabajo son parte de un depósito tipo *stockwork* que comprende un conjunto de venas multidireccionales con orientación definida o en varias direcciones que se intersectan entre sí (Corbett, 2018). Este yacimiento se encuentra alojados en Formación Caracol, que corresponde a una secuencia sedimentaria marina con facies toba

desvitrificada, lutita y arenisca que descansan discordantemente sobre la Formación Indidura (Imlay, 1936; Pinzón-Sotelo, 2012; Rocha-Rocha, 2016). Aunque las muestras forman parte de la misma unidad litológica, poseen características diferentes como el contenido variable de metales, materia orgánica y grado de alteración.

El presente trabajo tiene como alcance una investigación académico-científica con enfoque geometalúrgico que permita establecer el vínculo que existe entre el contenido de materia carbonosa en una mena diseminada en un yacimiento tipo *stockwork* y el efecto en la recuperación metalúrgica del plomo y zinc. La implementación de una evaluación metalúrgica a partir del uso de un cuadro de reactivos de flotación y al comparar los resultados de las pruebas de flotación al aplicar o no, remociones previas de materia carbonosa, nos brindara la información necesaria para identificar la variabilidad en el comportamiento de las muestras minerales.

Utilizaremos las características geológicas, para determinar su efecto en la etapa del procesamiento con el fin de lograr una modelación matemática, tratando de entender la relación que existe entre la materia carbonosa y la etapa de flotación, con la finalidad de lograr mejores recuperaciones de los concentrados de minerales valiosos en etapas posteriores, disminuyendo el contenido de materia carbonosa en las celdas de flotación de plomo-zinc.

Los compósitos establecidos (numerados del 1 al 5) entre dos muestras minerales presentan variabilidad mineralógica, así como diferencias del contenido orgánico. Estas muestras serán procesadas para conocer su respuesta en el proceso metalúrgico. La caracterización mineralógica y metalúrgica será aplicada con el fin de conocer a detalle la mineralogía, texturas, asociaciones, composiciones y contenidos de metales.

## 1.1. JUSTIFICACIÓN

---

La materia carbonosa se comporta como un agente perjudicial para la flotación de sulfuros de menas polimetálicas, reduciendo el efecto de los reactivos químicos, contaminando los concentrados minerales y adsorbiendo el oro en la etapa de lixiviación.

La presente investigación se basó en el proceso de flotación de minerales para determinar el comportamiento metalúrgico de los compósitos respecto a la variación de las características geológicas de una mena polimetálica, estableciendo parámetros y relaciones con la respuesta metalúrgica. Se propuso un método de pre-flotación de remoción física con el cual se busca tener más opciones para contrarrestar los efectos de la materia carbonosa en la flotación de minerales y etapas posteriores.

La evaluación de la respuesta metalúrgica será llevada a cabo analizando los resultados de una flotación sin remoción de materia carbonosa (SR) y comparándolos con los resultados de las pruebas de flotación al que se le realizaron una pre-flotación con remoción fisicoquímica (RFQ) y una pre-flotación con remoción física (RF). Fue utilizado un mismo cuadro de reactivos, determinando indirectamente la cantidad removida de carbón para analizar el efecto en el comportamiento de la recuperación metalúrgica de las especies de valor, al tener mena con diferentes contenidos de materia carbonosa y de alteración hidrotermal. Identificamos variables independientes a partir de una caracterización mineralógica y dependientes por medio de pruebas metalúrgicas, con las cuales se busca formular modelaciones matemáticas empíricas con el fin de predecir la respuesta metalúrgica a través de correlaciones geometalúrgicas.



---

## 1.2. HIPÓTESIS

---

La materia carbonosa contenida en las muestras minerales, influye directamente en el proceso metalúrgico de concentración de metales de valor. La aplicación de métodos de remoción de materia carbonosa tales como remoción física y fisicoquímica (pre-flotación), ayudan a atenuar en diferente grado los efectos que la materia carbonosa produce en los concentrados y su efecto puede ser correlacionado con las características geológicas por medio de modelos matemáticos empíricos.

---

## 1.3. OBJETIVO

---

Correlacionar el efecto de la materia carbonosa en la recuperación de especies minerales de valor en una flotación plomo-zinc, con el propósito de modelar matemáticamente la respuesta metalúrgica para predecir el comportamiento, para su aplicación a yacimientos polimetálicos tipo *stockwork* con mineralización diseminada desde un enfoque geometalúrgico.

---

## 1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

---

- Caracterizar las muestras mediante descripciones petrográficas, para determinar el tipo roca, texturas y grado de alteración.
- Caracterizar la mineralogía identificando las especies minerales presentes incluyendo metálicos y no metálicos, utilizando técnicas de caracterización tales como difracción de rayos x, microscopía electrónica de barrido y espectroscopia de absorción atómica, para determinar los minerales de ganga y mena; tipos de asociaciones minerales, contenidos de metales de interés y características de la materia carbonosa.

- Realizar pruebas metalúrgicas propias del procesamiento de minerales, tales como trituración, cinética de molienda y pruebas de flotación para determinar el comportamiento metalúrgico de la mena.
- Elaborar modelos matemáticos empíricos con los resultados de la caracterización mineralógica y de las pruebas metalúrgicas, los cuales deberán analizarse e interpretarse para lograr una modelación matemática con el fin de representar la respuesta metalúrgica en función de las propiedades geológicas.

---

## 2. ANTECEDENTES DE LA GEOLOGÍA DEL CARBÓN Y SU EFECTO EN LA FLOTACIÓN DE SULFUROS

---

### 2.1. GEOMETALURGIA

La geometalurgia clasifica a los minerales respecto a su comportamiento en un proceso metalúrgico definido (Marchese, 2005). Esta disciplina es integradora y emergente, donde se incorporan los diferentes aspectos de planificación minera desde la fase de exploración (Romero, 2017) o como base en la etapa de explotación mineral mediante el ensayo de muestras representativas y caracterización geometalúrgica, permitiendo capturar la variabilidad espacial de ciertas propiedades metalúrgicas propias de la roca (Preece, 2006).

Una de las labores prácticas de esta disciplina es la cuantificación de la variabilidad mineral en los parámetros del proceso tales como dureza del mineral, cinética de flotación y cinética de lixiviación, reduciendo el impacto de incertidumbre al momento del procesamiento, principalmente en depósitos altamente variables y varios depósitos minerales cercanos que estén siendo minados juntos (SGS, 2007).

El conocimiento geológico, minero y metalúrgico se integra estadísticamente para optimizar los planes de producción, asegurar proyecciones y disminuir riesgos en la producción minera pudiendo ser utilizada en proyectos Greenfield y Brownfield (Johnstone, 2016). El proceso geometalúrgico comienza con un muestreo representativo y selección de muestras, en donde los compósitos son ideales para llevarlo a cabo, debido a que representan diferentes tipos de roca, alteración y/o mineralogía. La ley de cabeza no es el único criterio para definir compósitos, ya que

el tipo de roca tiene más efecto en la molienda que la propia mineralogía, y la alteración puede modificar la recuperación en la lixiviación y en la flotación por el exceso del contenido de arcillas (Marchese, 2005).

## 2.2. GEOLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO

### 2.2.1. Zona de estudio (Localización y Vías de acceso).

La zona de estudio está al noreste del estado de Zacatecas, a 19 kilómetros al poniente de la cabecera del municipio de Mazapil, entre las coordenadas 24.670808, -101.719577 y 24.662384, -101.656062. El acceso a la zona de estudio es a través de la carretera 54 Zacatecas-Saltillo y posteriormente al kilómetro 229+300, girar a la desviación hacia la carretera 82, hasta llegar a la Unidad Minera Peñasquito (Figura 1).

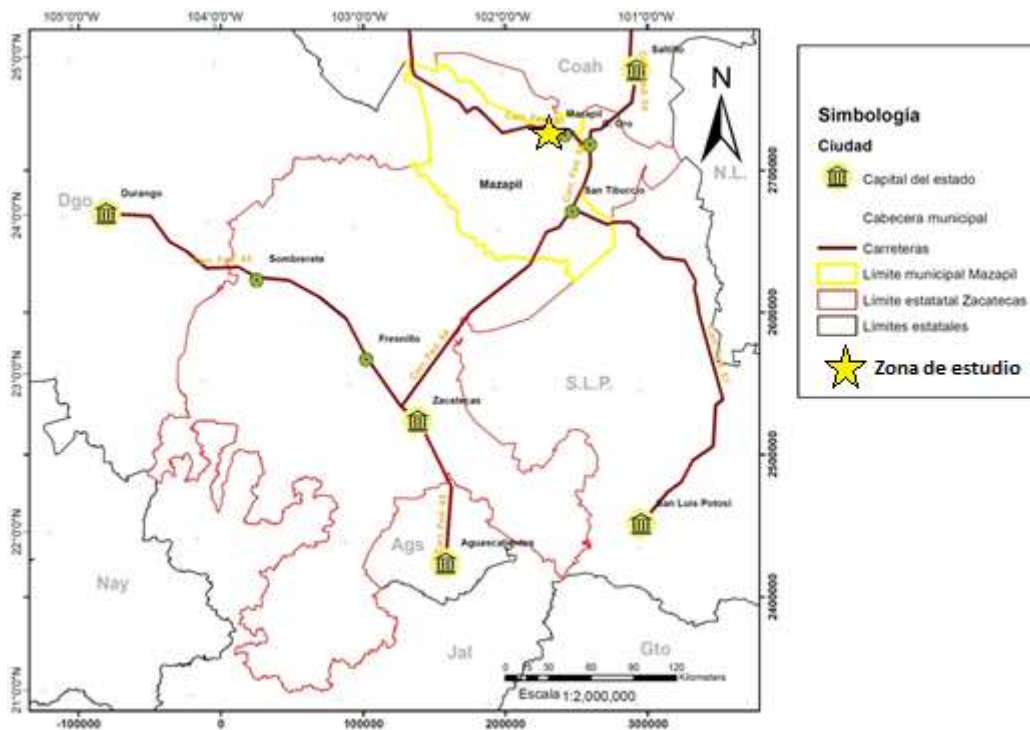


Figura 1. Mapa de localización.

### 2.2.2. Geología Regional.

Fisográficamente la zona de estudio pertenece a la provincia “Sierra Madre Oriental”, dentro de la sub-provincia “Sierras Transversales”. Esta sub-provincia es casi perpendicularmente a los ejes centrales de la Sierra Madre Oriental, con dirección E-W, y comprende una parte de los estados de Nuevo León, Coahuila y la parte noreste del estado de Zacatecas. Las estructuras geológicas existentes son sierras menores con estratificación y plegamiento de rocas sedimentarias marinas, como calizas, areniscas y lutitas (cretácicas y jurásicas). En esta provincia es común encontrar paisajes geomorfológicos maduro-senil con sierras, lomeríos y valles rellenos de gruesas capas de material aluvial, siendo que los procesos erosivos han jugado un papel importante en el modelado de la superficie terrestre (Raisz, 1964).



**Figura 2.** Mapa de provincias geológicas (Ortega-Gutiérrez, 1991). La estrella amarilla representa el lugar de la zona de estudio en la provincia geológica Cinturón Mexicano de Pliegues y Fallas.

Tectónicamente el área debe tener un basamento tipo terreno Sierra Madre conformado por rocas metamórficas paleozoicas (Campa y Coney, 1983). El área de estudio corresponde a la provincia geológica Cinturón Mexicano de Pliegues y Fallas (Figura 2), el cual es una franja de estructuras sinclinales y anticlinales laramídicos orientada norte-noroeste a sur-sureste formada por rocas metamórficas, sedimentarias e ígneas de edad Precámbrico, Paleozoico, Triásico, Jurásico y Cretácico (Ortega-Gutiérrez, 1991). Esta provincia forma la cadena de pliegues y fallas más extensa de México y está bordeada por la provincia Zacatecana al sur, Plataforma de Coahuila al norte, por el Miogeosinclinal del Golfo de México y la plataforma Valles-San Luis Potosí al este; y por la Faja Ignimbrítica Mexicana al oeste (Rocha-Rocha, 2016).

### **2.2.3. Estratigrafía.**

El paisaje estratigráfico actual comprende una secuencia marina mesozoica que fue deformada durante el cenozoico por la Orogenia Laramide así como rocas plutónicas y volcánicas que se depositaron durante el Paleógeno también relleno aluvial cubriendo la mayoría de los valles de edad Cuaternario (Rocha-Rocha, 2016).

La secuencia estratigráfica de la región comprende rocas Triásicas, Jurásicas y Cretácicas, aflorando principalmente en anticlinales que han sido estudiados a detalle en programas de barrenación de unidades mineras locales. En los anticlinales La Caja-Concepción del Oro, Santa Rosa, y Santa Rita, los pliegues fueron alterados debido a la intrusión de magma de composición félsico-intermedio, causando metasomatismo y metamorfismo de contacto (Rocha-Rocha, 2016).

En la zona de estudio, las estructuras geológicas encontradas, tal como el plegamiento y la generación de fallas de empuje y laterales, se formaron entre el Cretácico tardío y el Eoceno.



Durante el Oligoceno las cuencas se desarrollaron, y tiempo después esas cuencas fueron rellenadas por material aluvial, debido a la erosión de rocas preexistentes. El último evento ocurrió a finales del mioceno siendo derrames lávicos de un vulcanismo máfico (Rocha-Rocha, 2016).

Por cuestiones prácticas, para el presente trabajo, omitiremos la secuencia estratigráfica del Triásico y Jurásico, abordando únicamente el Cretácico tardío, debido a que las formaciones geológicas de este periodo, son de interés por las características mineralógicas y estructurales del tajo donde se obtuvieron las muestras para el presente proyecto.

### **Cretácico tardío**

#### **Formación Caracol**

La Formación Caracol es una formación geológica de edad Cretácico Tardío (Coniaciano 89 Ma.-Santoniano 83 Ma.). El nombre dado a esta formación es debido a la localidad tipo Arrollo el Caracol, encontrado al este de la Sierra de Parras, Coah., En donde Imlay (1936) la describió por primera vez como una secuencia rítmica de tobas desvitrificadas, lutitas y areniscas con contenidos menores de caliza.

A través de los años, diversos autores han descrito a la Formación Caracol en distintas localidades cercanas, tal como De Cserna (1956) la describió como una alternancia de lutita calcárea con lutita y limolita calcárea de color gris que altera a amarillo; Rogers *et al.* (1956) describieron a esta formación como intercalaciones de lutita y arenisca, donde cerca de Concepción del Oro es moderadamente calcáreo a arenosa y se presenta en estratificación delgada a masiva; Pearson *et al.* (1988) como una alternancia de capas de arenisca y limolita de espesores variables, con intercalaciones de material carbonoso presentándose con estratificación cruzada,

laminación paralela, slumps, clastos flotados y poca bioturbación; Enciso de la Vega (1963) describe a esta formación como una sucesión de intercalaciones de arenisca de grano fino a medio, lutita arenosa y arcillosa; Pinzón – Sotelo (2012) describe la Formación Caracol en el área de Concepción del Oro como una alternancia rítmica de arenisca de grano fino a arenisca de grano grueso y lutita, en donde los estratos muestran estructuras tabulares a acuñadas con contactos rectos y erosivos, donde se describen dos unidades para esta formación; 1) miembro Tierras Blancas y 2) miembro Rancho Viejo, a los cuales aproxima un espesor aproximado de 1000 a 1200 metros.

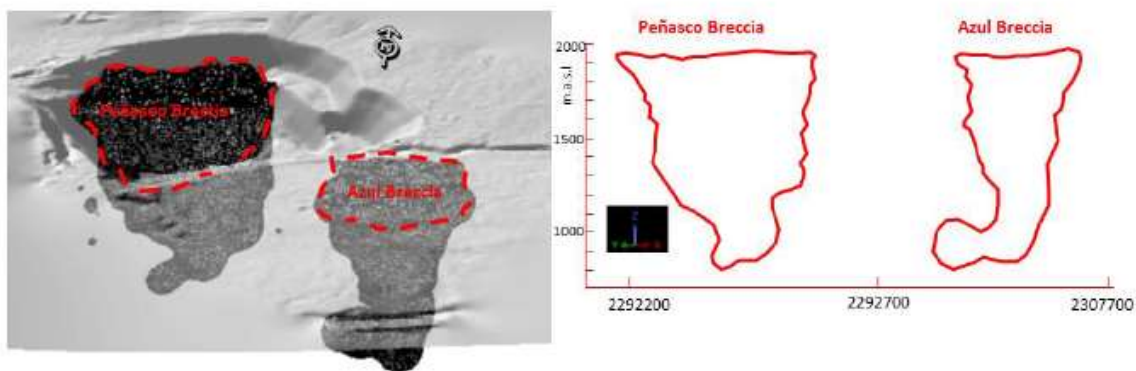
La relación estratigráfica de la Formación Caracól con otras formaciones geológicas es en el contacto inferior con la Formación Indidura siendo esta transicional y concordante, mientras que en el contacto superior en la zona de estudio se encuentra una cubierta aluvial del periodo Cuaternario. El ambiente de depósito en la cual fue formada Barboza *et al.* (2004) definen que por su litología y rasgos sedimentológicos estos depósitos ocurrieron en una cuenca de poca profundidad, con libre circulación y parcial influencia del oleaje dentro de una zona sublitoral, entre 50 y 100 metros de profundidad. PEMEX (1988) interpretó un ambiente deposicional como una secuencia tipo *flysch* asociado a frentes deltaicos y prodelta. El depósito de la Formación Caracol modificó las condiciones deposicionales de las plataformas carbonatadas (De Cserna, 1956). Pearson (1988) determina el ambiente deposicional como un delta o un estuario.

#### **2.2.4. Yacimientos Minerales.**

El yacimiento mineral El Peñasquito concesionado a la empresa Newmont, es un yacimiento polimetálico (Au, Ag, Pb, Zn, Cu) de clase mundial que tuvo reservas por más de 20 millones de onzas de oro, 1,000 millones de onzas de plata, 6,000 millones de libras de plomo y

14,000 millones de libras de zinc (Rocha-Rocha, 2016). Este yacimiento alberga distintos tipos de mineralización a profundidad, como diatremas, *stockwork* de sulfuros, sistema de *skarn* cúpula de Plutón mineralizado (Rocha-Rocha, 2016).

Las dos brechas diatremas denominadas Peñasco y Brecha Azul (Figura 3) que se disponen con una alineación noreste-sureste a un rumbo aproximado de 320° y espaciadas entre ellas aproximadamente 740 metros. Al borde suroriental de la diatrema Azul, un *stockwork* de sulfuros polimetálicos desarrollado en la Formación Caracol (Rocha-Rocha, 2016).



**Figura 3.** Modelo geométrico de las brechas Peñasco y Azul (Rocha, 2016).

Los minerales económicamente rentables se depositaron en brechas freatomagmáticas o diatremas con mineralización diseminada, aunque en el complejo se identificaron otras estructuras tales como vetas de alta ley, sulfuros en *stockworks*, sulfuros masivos en mantos, mineralización tipo *skarn*/cuerpos de reemplazamiento y hasta un pórfido cobre – molibdeno (Rocha-Rocha, 2016).

El tajo Chile Colorado, de donde provienen las muestras, específicamente de la parte sur o del *stockworks*, forma parte de la diatrema Brecha Azul, en donde la mineralogía de valor abarca sulfuros de metales base, sulfosales, óxidos, oro y electrum, mientras los minerales accesorios

comprenden carbonatos, calcosilicatos, fluorita y cuarzo. Las alteraciones se han identificado como potásica, filica y una sobreimpresión de calcita por el retrógrado del sistema (Rocha-Rocha, 2016).

Este *trend* de mineralización (Figura 4) abarca desde una profundidad con referencia de la superficie de la zona de estudio, de aproximadamente 50 metros, encontrándose en Formación Caracol como roca encajonante de edad Cretácico tardío, donde la mineralización es diseminada en hornfels con una alteración potásica moderada, alteración filica de débil a pervasiva y sobreimpresión de carbonatos por efecto retrogrado del sistema. En la Formación Indidura la barrenación a diamante ha determinado la existencia de hornfels, skarn y skarnoide con mineralización polimetálica diseminada, así también como mantos de sulfuros masivos, una pequeña porción de la diatrema Peñasco y Azul se encuentran en esta Formación (Rocha-Rocha, 2016).

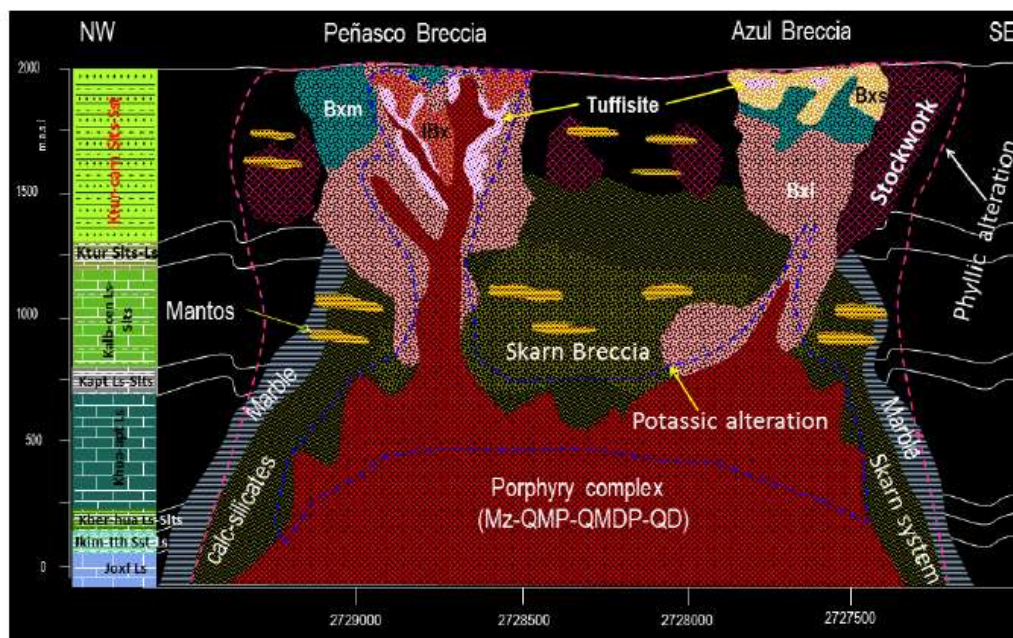


Figura 4. Sección geológica del yacimiento mineral Peñasquito (Rocha-Rocha, 2016).

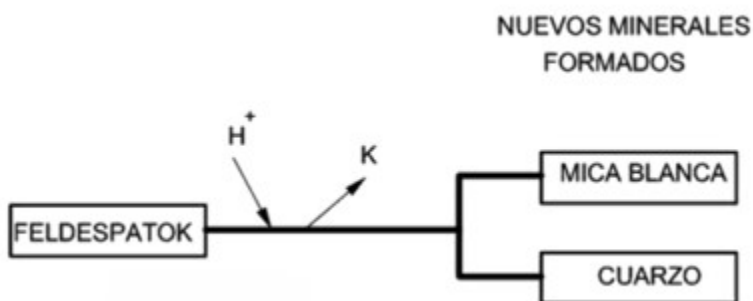
### 2.2.5. Alteración Hidrotermal.

El cambio en la mineralogía original es generado a partir de la interacción de la roca con fluidos hidrotermales, en donde este proceso de mineralización se debe a la integración y desintegración de minerales existentes por los cambios de condiciones del medio, tales como pH, mineralogía, química y temperatura. La mineralogía de alteración hidrotermal prógrado es generada a partir de una fuente interna en la corteza que genera fluidos, aumentando la alteración de la roca, es decir, al aumento en los cambios de condiciones que sufre, principalmente temperatura, pH, química y mineralogía (Corbett, 2017).

La mineralogía de alteración retrograda es desarrollada como una degradación de un estilo de alteración prógrado y comúnmente los minerales generados en este tipo de alteración son más hidratados y formados en un ambiente de menor temperatura. Los sistemas de alteración retrógrado más comunes son el cinemático, donde se generan minerales nuevos, tales como granates a partir de caliza; pseudomorfos, donde los minerales retrógrados reemplazan a los más antiguos; pervasivo, en este tipo de alteración puede el total de la roca ser reemplazada (Corbett, 2017).

Los minerales de alteración del grupo de la clorita son formados a un pH entre 5 y 6 coexistiendo con los minerales del grupo de la illita, los cuales son formados a un mismo pH, pero variando en la cristalinidad que es gobernada por la temperatura dependiente de la profundidad de formación. En este grupo algunos minerales como la formación de la sericita varía entre 250°C y 350°C mientras que el proceso de alteración retrógrado representa un cambio en la química de las soluciones y la dinámica en el sistema hidrotermal. Una alteración común de un sistema retrógrado es la alteración fílica que es formada por el reemplazo del feldespato potásico a condiciones de pH alrededor de 4 y 7, alta temperatura mayor a 350°C y caracterizada por la asociación de cuarzo-

pirita-sericita y clorita, donde a altas temperaturas la sericita está dominada por micas blancas y hay aparición de corindón y andalucita (Figura 5). La sericita proviene principalmente de la desestabilización de los feldespatos en presencia de  $H^+$ ,  $OH^-$ , K y S, para formar cuarzo, mica blanca, pirita y algo de calcopirita (Corbett, 2017).



**Figura 5.** Esquema representativo de la conversión de feldespato potásico en sericita y cuarzo.

La sericitización de los feldespatos potásicos (ortoclasa) se lleva a cabo a partir de la siguiente reacción a una temperatura de 300-400°C:



## 2.3. GEOLOGÍA DEL CARBÓN.

### 2.3.1. Descripción del carbón.

El carbón es una roca sedimentaria sólida oscura, estratificada y es el combustible fósil más abundante, resultado del enterramiento de materia orgánica vegetal a través de las eras geológicas en donde sufrió cambios biológicos iniciales debido a la acción de microorganismos y posteriormente físico-químicos a causa de la presión y temperatura (Cortés, s/f).

La génesis de este combustible es un proceso complejo donde intervienen factores biológicos, físicos y químicos que determinan su capacidad calorífica. La carbogénesis o carbonización es el proceso de transformación por el cual se origina el carbón a partir de sustancias vegetales, fundamentalmente plantas superiores (madera) y en menor grado organismos inferiores como algas, esporas o pólenes (Cortés, s/f.).

El carbono (principalmente), el hidrógeno y el oxígeno son los componentes mayoritarios del carbón, aunque también puede contener azufre, nitrógeno, y otros elementos. Dependiendo de su antigüedad, de las condiciones de formación y de su contenido en carbono y materias volátiles, existen distintos tipos, con texturas y poder calorífico diferente. Se suele medir la calidad por el porcentaje de: carbono fijo, materia volátil, humedad, azufre, hidrógeno, y por el poder calorífico (Junta de Castilla y León S.A., 2009).

De acuerdo al poder calorífico y al rango, se clasifica en cuatro tipos, siendo esta la primera clasificación basada en caracteres fácilmente reconocibles y en un creciente contenido de carbono que marca la directriz de la carbonización (Rodríguez, s/f.)

### **Turba**

Es el tipo de carbón que se forma en la primera etapa de la transformación de la materia vegetal en un ambiente pobre en oxígeno, siendo el que tiene menos contenido de carbono y por consiguiente menos poder calorífico en la combustión (Junta de Castilla y León S.A., 2009). El contenido de carbono es alrededor del 59%, de hidrógeno 5.7% y de oxígeno 35%, el poder calorífico varía de 5,400 a 5,700 Kcal/Kg relativo al combustible puro, y un porcentaje de volátiles alrededor del 67% (Cortés, s/f.).

## **Lignito**

Es un tipo de carbón muy abundante que posee mayor poder calorífico que la turba, es de color negro o pardo y posee una estructura leñosa o fibrosa, tiene una elevada humedad y materia volátil, se le denomina también “carbón sub-bituminoso” y es de formación más reciente que la hulla y la antracita (Junta de Castilla y León S.A., 2009). El contenido de carbón es aproximadamente 70%, de hidrógeno 5.5% y de oxígeno 24.5%, tiene un poder calorífico entre 6,450 y 6,750 Kcal/kg relativo al combustible puro y un porcentaje de volátiles de 54% (Cortés,s/f.).

## **Hulla**

La Hulla también denominado “carbón bituminoso”. Puede utilizarse en la combustión y en la industria siderúrgica. Este tipo de carbón dio origen a la carboquímica (Junta de Castilla y León S.A., 2009). El contenido de carbón es aproximadamente entre 88% y 93%, de hidrógeno de 5.3% a 3.8% y de oxígeno entre 6.5% a 2.7%, tiene un poder calorífico entre 8,700 y 8,400 Kcal/kg relativo al combustible puro y un porcentaje de volátiles entre el 30% y el 9% (Cortés, s/f).

## **Antracita**

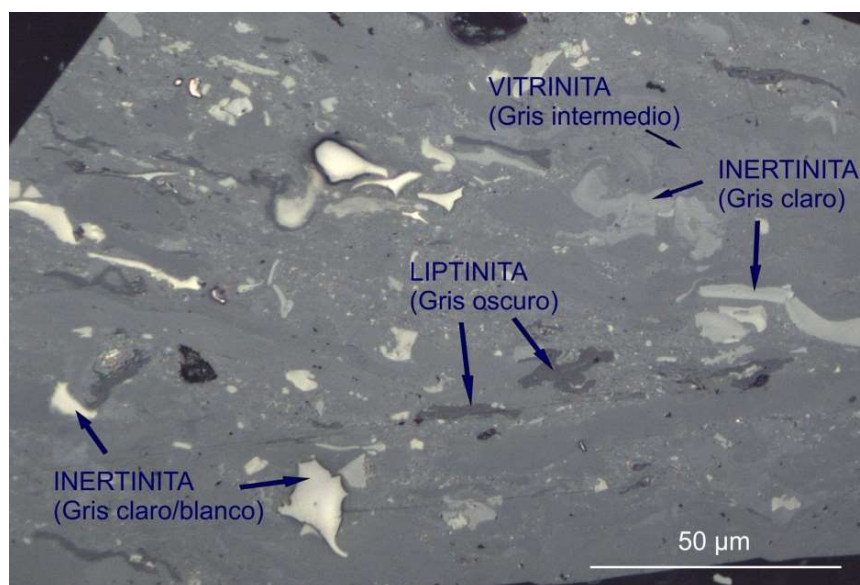
Carbón duro, muy evolucionado, que tiene el mayor contenido en carbono fijo, el mayor poder calorífico y el menor contenido en materias volátiles de los cuatro tipos citados, tiene una estructura cristalina y un color negro brillante (Junta de Castilla y León S.A., 2009). El contenido de carbón es aproximadamente 95.5%, de hidrógeno 2.5% y de oxígeno 2%, tiene un poder calorífico entre 8,300 y 8,400 Kcal/kg relativo al combustible puro y un porcentaje de volátiles de 3% (Cortés, s/f.).



### 2.3.2. Grupos y tipos de macerales.

Los macerales son entidades discretas constituyentes del carbón, que pueden ser observadas al microscopio y se distinguen por sus propiedades ópticas debido al cambio de su estructura y composición química (Guerrero, 2017). Suárez *et al.* (in Guerrero, 2017) mencionan que básicamente los macerales son los restos carbonificados de tejidos de las plantas o sustancias derivadas de las plantas existentes en el momento de la formación de la turba.

Los macerales están distribuidos en tres grupos: liptinita, vitrinita e inertinita. Los macerales del grupo de la liptinita son los más oscuros (Figura 6), los del grupo de la vitrinita se observan de color gris intermedio y los del grupo de la inertinita de color más claro (gris claro/blanco/amarillo) (Guerrero, 2017). La clasificación es basada en la de Stopes (1935) y conocida como Stopes-Heerlen, y el sistema fue realizado por el International Committee for Coal and Organic Petrology (ICCP) en 1957 y que ha realizado revisiones en los años 1994, 2001, 1998, 2017 (Guerrero, 2017).



**Figura 6.** Macerales en microscopía óptica de transmisión (Gómez et al., 2007)

### **Grupo de la Liptinita**

Deriva de organismos acuáticos como algas, bacterias o partes de plantas superiores constituidas por sustancias ricas en hidrógeno alifático. Se incluyen en el grupo de productos de degradación metabólica o bacteriana y productos generados durante la carbonificación (Guerrero, 2017).

### **Grupo de la Huminita/Vitrinita**

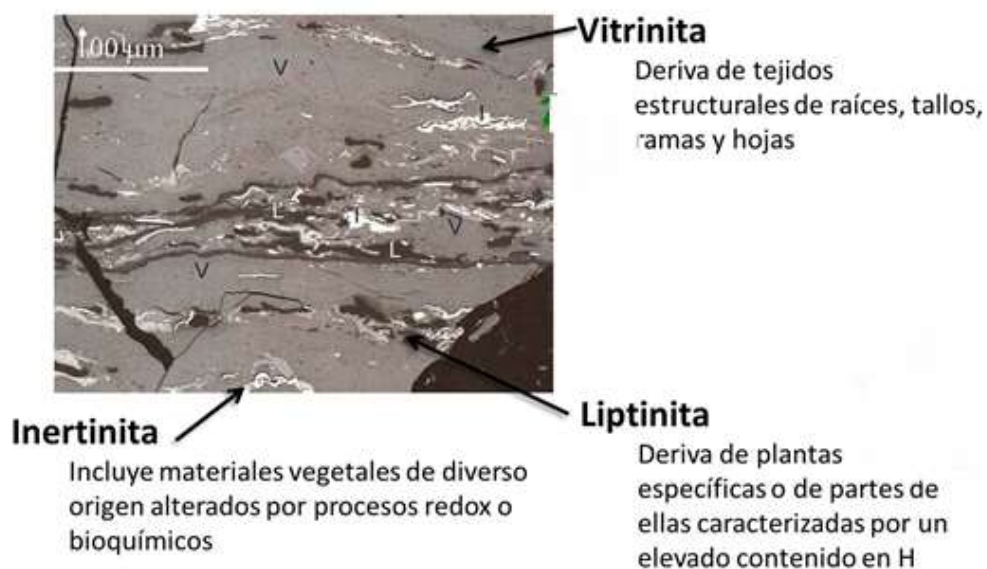
Es el grupo mayoritario, cuantitativamente en la mayoría de los carbones, dependiendo del rango se puede clasificar como huminita o vitrinita, siendo huminita para lignitos y vitrinita para carbones bituminosos (Guerrero, 2017). Estos grupos derivan de sustancias húmicas originadas a partir de la celulosa y lignina presentes en los tejidos de las plantas superiores, conteniendo el contenido más alto de oxígeno y su estructura química se encuentra formada por compuestos aromáticos (Guerrero, 2017).

### **Grupo de la Inertinita**

Este grupo incluye material de diversos orígenes que han sido alterados por procesos redox o bioquímicos; tejidos de plantas superiores, hongos, material granular fino formado durante la carbonificación y secreciones celulares (Guerrero, 2017). Dentro de este grupo puede dividirse los macerales que derivan de tejidos de plantas superiores a través de diversos procesos de alteración, como procesos de desvolatilización rápida, acción bioquímica, deshidratación y meteorización, dando como resultado el aumento de aromaticidad, lo que conlleva a un aumento de reflectancia (Guerrero, 2017).

### 2.3.3. Petrografía del carbón.

El uso de la petrografía dentro de la industria del carbón dio comienzo aproximadamente en el primer tercio del siglo XIX, cuando Hutton examinó una lámina delgada de carbón y concluyó que estaba formado por materia vegetal (Guerrero, 2017).



**Figura 7.** Descripción de macerales observados en microscopía óptica (Gómez et al, 2007).

Las técnicas petrográficas de caracterización del carbón consisten en determinar los distintos macerales (fracción orgánica) a través de la reflectancia de pequeñas muestras pulidas de carbón (Figura 7). La reflectancia del maceral es la proporción de luz incidente que es reflejada, en condiciones específicas de iluminación. La reflectancia se correlaciona con la aromaticidad de los compuestos orgánicos del carbón, en general la reflectancia aumenta con el rango de carbón para todos los macerales (Cortés, s/f).

### **Microscopía del grupo de la Liptinita**

Este grupo es caracterizado por tener un color gris oscuro a negro, pudiendo ser transparente indistinguible de la luz blanca, pero puede poseer reflexiones internas a bajos rangos y reflectancia menor que la vitrinita, siendo para este grupo alrededor de Rr 1,10 % a 1,40 % dependiendo del origen del carbón (Guerrero, 2017).

Generalmente, la Liptinita es isótropa, retiene la forma del componente original y es el grupo maceral que experimenta una variación más rápida de sus propiedades ópticas con el rango, la dureza es menor que la vitrinita y la densidad puede ser de 1.18-1.35 g/cm<sup>3</sup>, presentando fluorescencia de intensidad variable cuando se somete a luz ultravioleta, variando del verde al pardo al aumentar el grado de evolución o rango, hasta desaparecer a mayor evolución del maceral (Guerrero 2017).

### **Microscopía del grupo de la vitrinita**

Las características ópticas son de color gris intermedio, entre la Liptinita e Inertinita del mismo carbón, reflectancia intermedia, desarrollando anisotropía a reflectancias (Rr) mayores a 1.3%, pudiendo tener o no estructura celular. Su dureza es intermedia y el relieve de pulido bajo, densidad de 1.2 a 1.8 g/cm<sup>3</sup>, presenta fluorescencia que es apreciable para rangos muy bajos (Guerrero, 2017).

### **Microscopía del grupo de la Inertinita**

Las características más comunes de la Inertinita son colores blancos, amarillentos, con una mayor reflectancia que la vitrinita, puede o no presentar estructura celular, las propiedades ópticas

varían menos en función del rango en comparación con la Vitrinita y la Liptinita. La dureza es mayor que la de la Vitrinita, generando un relieve en el pulido de intermedio a alto, tiene una densidad de 1.35 a 1.36 g/cm<sup>3</sup>, generalmente no presenta fluorescencia (Guerrero, 2017).

## **2.4. EFECTOS DEL CARBÓN EN LA RECUPERACIÓN DE SULFUROS POR FLOTACIÓN**

### **2.4.1. Flotación de minerales.**

La flotación de minerales es el proceso de concentración metalúrgica mediante el cual partículas minerales sólidas, previamente liberadas y contenidas dentro de una masa líquida, pueden ser separadas por efecto de la acción química de reactivos específicos y por la formación de burbujas de aire. El proceso de la flotación comienza con una molienda del mineral en donde se reduce de tamaño para poder ser liberado para posteriormente agitarlo en una masa de agua adicionando aire u otro gas. Deben ser adicionados los reactivos químicos, compuestos orgánicos o aceites para modificar la superficie de las partículas de valor y puedan adherirse, logrando un ascenso y recuperación de estas partículas para formar un concentrado de las partículas de interés (López-Aburto, 2004).

En general, existen dos tipos de flotación: flotación a granel o masiva y flotación selectiva. La flotación masiva se utiliza cuando se requieren flotar todas las especies de interés para formar un concentrado de diferentes especies de valor. La flotación selectiva se utiliza para flotar determinadas especies minerales y obtener un concentrado enriquecido únicamente de esas especies. Una variante de la flotación selectiva es la flotación diferencial, en donde se obtiene el concentrado de interés en los relaves o colas del proceso metalúrgico (López-Aburto, 2004).

La mojabilidad, tensión superficial y adsorción, son los tres principios fisicoquímicos fundamentales para llevar a cabo el proceso de flotación de minerales, debido a que estas tres propiedades influyen directamente en las propiedades de las partículas minerales para lograr una flotación efectiva. (López-Aburto, 2004).

A lo largo del tiempo, diversos autores han estudiado ampliamente al carbón mineral, principalmente para el aprovechamiento como combustible fósil o como indicador de existencia de hidrocarburos como gas o petróleo (Mariño y Mojica, 2014).

El carbón al ser un material muy heterogéneo se comporta de distintas maneras al momento de tratarlo. Este compuesto está constituido por una fracción orgánica que son los distintos tipos de macerales y la fracción inorgánica que es el azufre y la materia mineral (Leonard, 1991; Blaschke, 1996). Dentro de las fracciones orgánicas el comportamiento hidrofóbico es generado por el tipo maceral y puede determinarse a partir del ángulo de contacto, en donde la liptinita varía entre 90° y 130°, la vitrinita entre 60° y 70°, y la inertinita es la menos hidrofóbica con 25° y 40° (Barraza, 2011).

La evaluación del grado de liberación de los macerales del carbón, determina los componentes libres y mixtos mediante petrografía. Este estudio fue realizado al procesar el carbón como generalmente es llevado a cabo, al procesado de las rocas, usando un molino de bolas a distintos tiempos, resultando que la vitrinita puede encontrarse libre o liberar más fácilmente ya que es el componente principal o más común en el carbón mineral, seguido con la inertinita, y finalmente por su asociación con la vitrinita el microlitotipo de la liptinita (Gómez *et al.*, 2007).

La hidrofobicidad de un carbón bituminoso, dependerá de la acidez o basicidad de la solución. A pH 3, la fuerza de atracción entre burbujas y partículas de carbón es significativa; mientras que a pH 7 la carga de la superficie de las partículas (negativa) es actualizada convirtiéndose en fuerza repulsiva y a un pH 10 se intensifica (Li, 1993).

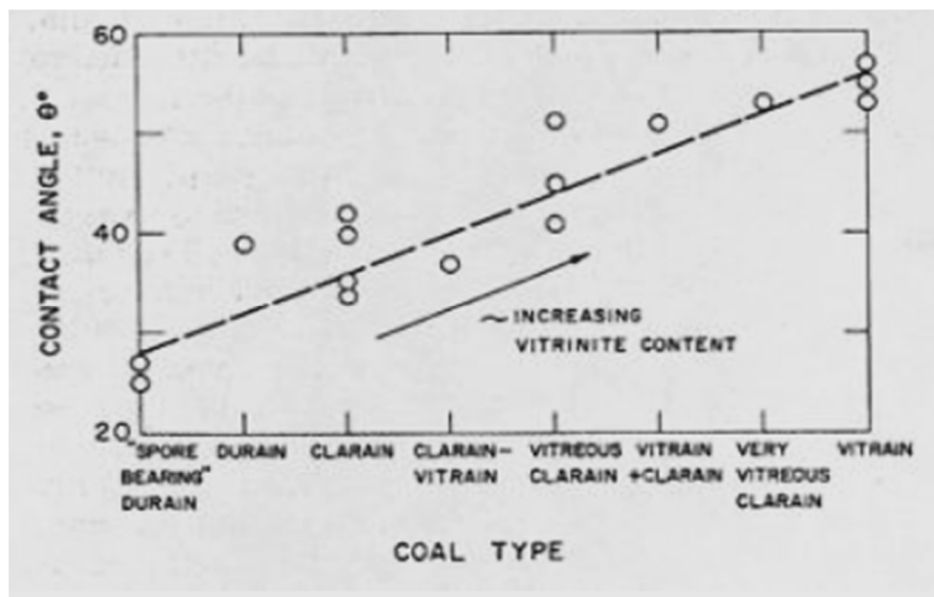
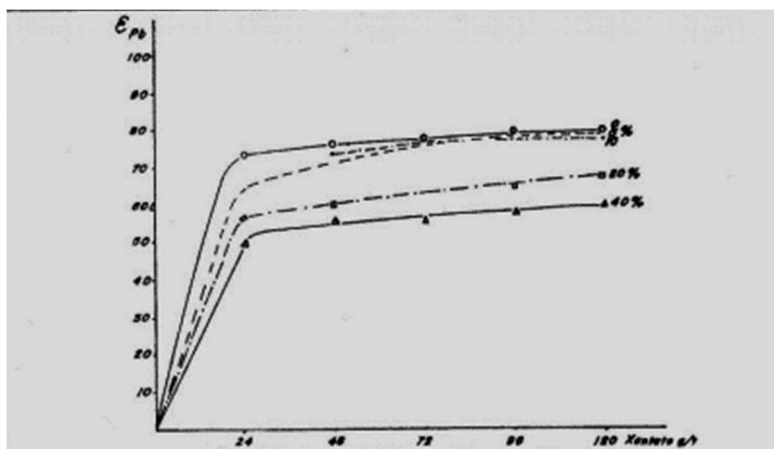


Figura 8. Diagrama exhibiendo el ángulo de contacto de litotipos del carbón (Horsley-Smith, 1951)

Durante el proceso de la flotación de carbón, ha sido evaluado que las soluciones sin espumante, con altas concentraciones de  $K^+$  y  $I^-$ , son asociadas con recuperaciones modestas de carbón alrededor de 44%, debido a que su presencia favorece a la formación de burbujas grandes; las soluciones ricas en  $Na^+$  y  $SO_4^{2-}$  intensifican la recuperación de carbón hasta un 60% por la formación de burbujas finas. El  $Mg^{2+}$  combinado con el  $Na^+$  puede dar una recuperación del 85%. El carbón aprovechable es determinado principalmente por fenómenos electroquímicos de la pulpa mineral y de la composición del agua, esto quiere decir que el comportamiento de la superficie no depende solamente de la química de la superficie, sino también de fuerzas electrostáticas (López-Saucedo *et al.*, 2014). El carbón es altamente sensible a la concentración de cloruro de sodio

(NaCl), lo cual al añadir sal común provoca una mayor recuperación de carbón en el proceso de flotación comportándose como activador (Luna, 2018).

Debido a las dificultades técnicas de aislamiento y a la investigación del material carbonoso que acompaña a las menas de plomo y zinc, existe muy poca información de sus características. Además, el contenido de este mineral es nocivo para los procesos del beneficio ya que requiere aumentar los reactivos, principalmente los colectores como xantato (Figura 9). Fueron determinados los contenidos variables de carbón en muestras minerales, para posteriormente procesarlas generando esquemas de flotación selectivas de plomo, utilizando como reactivos carbonato de sodio, silicato de sodio, almidón, cianuro de potasio, sulfato de zinc, sulfuro de sodio y variando la dosificación del colector xantato isopropílico de sodio, para determinar que, entre más proporción de carbón, será menor la recuperación de plomo (Liz, 1992).



**Figura 9.** Influencia del porcentaje de contaminación con carbón en los índices tecnológicos (recuperación) del proceso de flotación de plomo con contenido variable de xantato (Tomado de Liz, 1992)

El grafito actúa negativamente con los reactivos, debido a su comportamiento como tensoactivo. Algunas empresas contrarrestan los efectos al adicionar mayores cantidades de



reactivos tales como espumantes e incluso depresores, pero su costo es elevado y no se obtienen de igual manera concentrados de excelente calidad, por tanto, si, una base fuerte (NaOH o CaO) es añadida, aunado a una pre-flotación (Figura 10), se podrá retirar gran parte del carbón y obtener mejores resultados, por ende aumento en la ley de los concentrados aumentando 5 a 8% la recuperación del cobre en las flotaciones posteriores, logrando una disminución del 50% en uso de espumante y un aumento del 50 al 100% de la cinética de flotación implicando menor tiempo de residencia en el proceso (Schwarze, 2017).

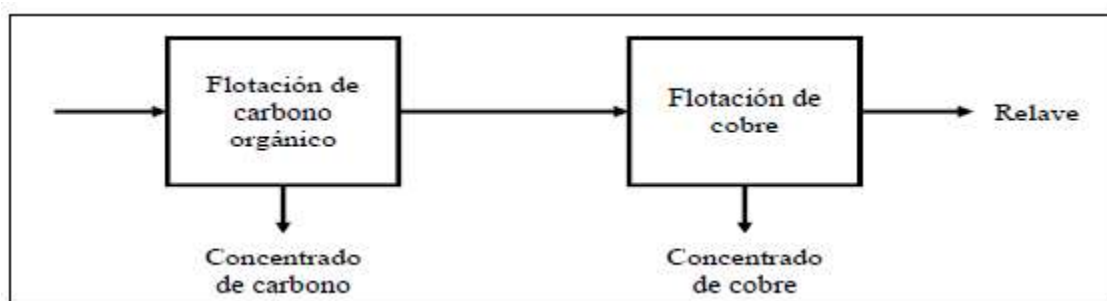


Figura 10. Diagrama de flujo mostrando una celda de pre-flotación de cobre (tomado de Schwarze, 2017).

#### 2.4.2. Métodos y reactivos utilizados para el tratamiento del carbón en la flotación de sulfuros y su respuesta metalúrgica

El comportamiento de un carbón en el proceso de flotación está determinado no solo por la flotabilidad natural (hidrofobicidad), sino también por la flotabilidad adquirida resultante de la adición de reactivos (Laskowsky, 2001). Franco y Palacios (2012) realizaron pruebas de depresión del carbón orgánico de una mena de cobre con dextrina, obteniendo como resultado que la dextrina no deprime los contenidos de cobre, en cambio sí deprime el contenido orgánico, reduciendo apreciablemente el grado del carbón orgánico en la espuma y aumentando el contenido en el producto de la celda. Por su parte, Guerrero (2012) realizó un estudio para determinar la flotación

de lodos finos mediante una cinética adicionando queroseno como colector y dos espumantes que fueron metil isobutil carbinol (MIBC) y aerofroth 65 (AF65). El mejor resultado fue al usar en conjunto el AF65 y el queroseno alcanzando una recuperación orgánica del 74% y menor contenido de cenizas 26%.

Piñeres *et al.* (2012) realizaron una flotación utilizando como espumante lauril eter sulfato de sodio al 28% y aceite de creosota como colector, obteniendo buenos resultados en la recuperación de carbón y estabilidad de la flotación. Schwarze (2017) realizó una pre-flotación de carbón de una mena de minerales de cobre, utilizando una base fuerte como es la sosa caustica (NaOH), así como con hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), donde el hidróxido de calcio actúa mejor y pudo ser determinado por la mayor recuperación, en comparación de la sosa caustica.

Aguilar (2020) determinó las condiciones favorables para la depresión del carbón de una mena de metales base, logrando deprimir hasta el 98% del carbón, con condiciones bajas de pH, un P80 de 70  $\mu\text{m}$  y adicionando compuestos orgánicos. Aguilar (2020) determinó el efecto de disminuir el contenido de carbón en concentrados, el resultado fue el aumento del grado de los metales de interés como el oro, plomo y zinc, aunque al aumentar la dosificación caía el grado de metales de valor nuevamente y aumentaba el contenido de materia carbonosa. La dextrina afectaba la recuperación de minerales de plomo y zinc, pero beneficiaba la recuperación de calcopirita a un pH de 8. La adición de dextrina favorece la hidrofiliidad del carbón, puesto que eleva su punto isoeléctrico obteniendo un buen rendimiento en la depresión (Yonggai, 2019).

### 3. METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN Y EFECTO DE LA MATERIA CARBONOSA EN LA FLOTACIÓN DE SULFUROS

Durante la presente investigación fue establecida una metodología experimental definiendo los métodos adecuados y el equipo necesario para obtener resultados con los cuales nos acercaran al propósito del presente trabajo y cumplir con los objetivos planteados. Esta metodología es conformada a partir de la recepción, identificación y preparación de muestras; caracterización mineralógica, pruebas metalúrgicas, correlaciones estadísticas y propuesta de modelos matemáticos (Figura 11).

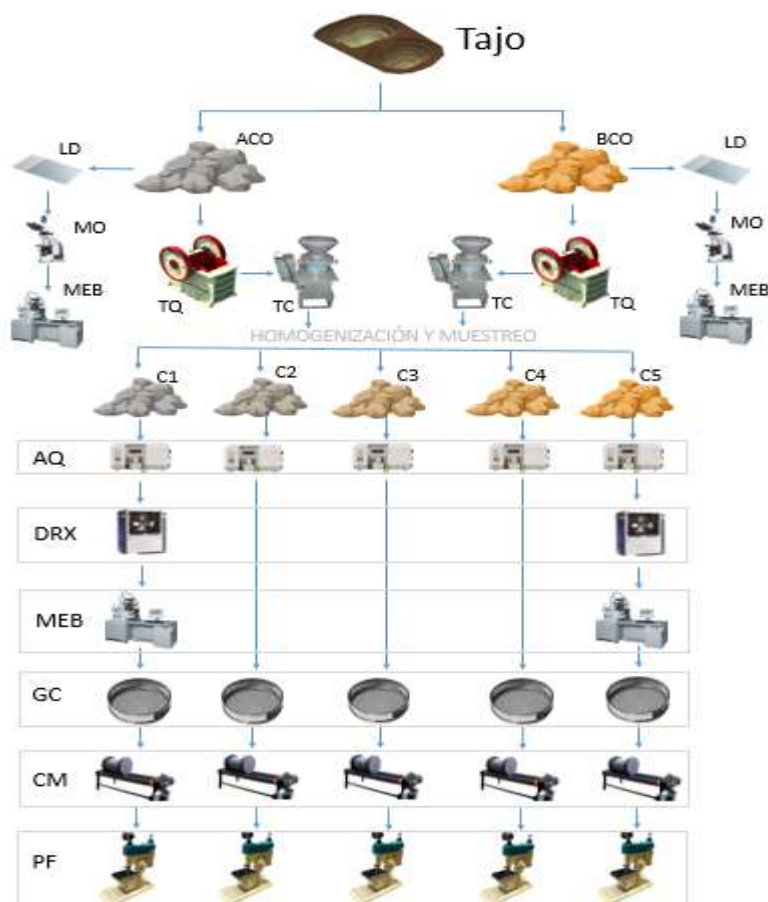


Figura 11. Diagrama de flujo representativo de la metodología experimental aplicada.

### 3.1. RECEPCIÓN DE MUESTRAS DE ESTUDIO

Fueron recibidas dos muestras procedentes de la Formación Caracol, de la parte sur del tajo Chile Colorado de la Unidad Minera Peñasquito (Figura 12) en donde se localiza el yacimiento tipo *stockwork*. La primera muestra denominada por la empresa como “201A” y la segunda “STMG (tapatía), contienen minerales de valor económico, minerales de ganga y carbono orgánico en distintas proporciones (Tabla 1).

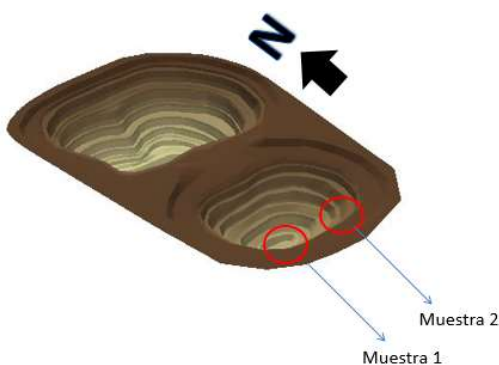


Figura 12. Representación de la zona del tajo de donde procedieron las muestras utilizadas en el presente trabajo.

Tabla 1. Resultados de análisis solicitados a la empresa de las muestras originales.

ID muestra	Composición química									
	Ag g/t	Pb %	Zn %	Cu g/t	Fe %	As %	Sb ppm	C org	C tot	S %
201A	109.7	0.301	1.211	685.224	3.629	0.024	403	0.405	2.15	1.29
	107.6	0.282	1.221	661.641	3.352	0.022	419	0.32	2.08	1.057
	106.6	0.29	1.175	631.113	3.233	0.021	405	0.309	2.14	1.05
<b>Ley promedio</b>	<b>107.97</b>	<b>0.291</b>	<b>1.202</b>	<b>659.326</b>	<b>3.405</b>	<b>0.022</b>	<b>409</b>	<b>0.345</b>	<b>2.12</b>	<b>1.132</b>
STMG	36.9	0.438	1.737	184.872	2.839	0.02	100	0.038	1.44	3.43
	36.2	0.407	1.617	171.909	2.636	0.019	88	0.039	1.45	3.41
	36.2	0.429	1.69	179.406	2.735	0.019	83	0.04	1.46	3.47
<b>Ley promedio</b>	<b>36.433</b>	<b>0.425</b>	<b>1.681</b>	<b>178.729</b>	<b>2.737</b>	<b>0.019</b>	<b>90.333</b>	<b>0.039</b>	<b>1.45</b>	<b>3.437</b>

La clasificación de las muestras fue realizada en función del porcentaje de carbono orgánico contenido en las mismas, y en base a este criterio se nombró con las siglas ACO (alto carbono orgánico) a la muestra 201A y BCO (bajo carbono orgánico) para la muestra STMG (Tabla 2). El peso total de ambas, fue de 168.84 kilogramos, distribuidos como se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 2.** Peso total de las muestras.

Muestra	Clave muestra	Peso (kg)	Total (kg)
201A	ACO	44.52	90
		45.48	
STMG	BCO	22.74	78.84
		18.9	
		15.62	
		21.58	
			168.84

Cada material estaba conformado por bloques rocosos con un diámetro promedio de 8 pulgadas. Se tomaron muestras de mano con un diámetro de 3 pulgadas aproximadamente, para realizar el análisis petrográfico (Tabla 3).

**Tabla 3.** Peso de las muestras utilizadas para elaborar láminas delgadas.

	Clave muestra	Peso (kg)
Laminación	ACO	1.781
	BCO	1.744

### 3.2. PREPARACIÓN DE MUESTRAS

Este proceso comenzó con la recepción de muestras, pesado, identificado y selección de muestras de mano representativas para la elaboración de láminas delgadas con fines petrográficos.

Posteriormente a la identificación y selección de testigos, las muestras pasaron por una etapa de trituración primaria y secundaria para reducir el tamaño de partícula aproximadamente a 1” y ¼” respectivamente, para posteriormente procesar el mineral en una trituradora de cono, logrando así un tamaño de partícula menor a 2,000 μm de diámetro (-10 mallas) del 95% de la muestra aproximadamente, siendo este el tamaño referencia para las posteriores experimentaciones.

Durante el proceso de trituración hubo pérdida de material, principalmente de la muestra BCO debido a la fragilidad de la roca al observarse fractura concoide, lo que ocasionaba que algunos fragmentos fueran lanzados en todas direcciones, a diferencia de la muestra con ACO que tuvo un comportamiento dúctil donde no se observó fractura concoide (Tabla 4).

**Tabla 4.** Porcentaje de pérdida de las muestras en la etapa de trituración en quebradora de quijada.

	Clave muestra	Peso (Kg)	% Perdida
Pérdida en trituración	ACO	1.459	1.564779065
	BCO	3.036	3.630710356

Al tener el 95% de las partículas menor a la malla 10 (2,000 μm) se realizó una homogenización del total de la muestra utilizando el método de cono y torta que consiste en verter poco a poco el mineral triturado sobre él mismo, en distintas ocasiones, para lograr una distribución de partículas uniforme en toda la muestra, formándose un cono de mineral al cual es necesario dispersarlo con una pala de manera radial, con el fin de tomar muestras representativas más fácilmente.

### 3.3. ESTABLECIMIENTO DE COMPÓSITOS

Un compuesto mineral es un compuesto de dos o más componentes heterogéneos para formar condiciones no existentes en la muestra, generando variabilidad de contenidos de minerales metálicos y materia carbonosa. Posterior a la homogenización con el método de cono y torta, se tomaron muestras representativas para establecer cinco compósitos con diferente proporción de las muestras originales, generando con esto variabilidad en los contenidos de minerales de valor y de ganga.

Fueron establecidos cinco compósitos a partir de las muestras ACO y BCO para generar variabilidad en la cantidad de contenido orgánico y minerales de valor económico, con el fin de evaluar la respuesta metalúrgica (Tabla 6). Ambas muestras fueron perfectamente homogenizadas con el método de cono y torta para lograr la misma distribución de contenidos minerales y carbono orgánico en toda la muestra; se pesó exactamente las proporciones necesarias para obtener la distribución mencionada, posteriormente se homogenizó nuevamente cada compósito tomando una muestra representativa para caracterización (Análisis químicos, microscopía electrónica de barrido y difracción de rayos-X). Cada uno de los compósitos pesa 30 kilogramos y la distribución de las muestras originales se muestra en la tabla 5.

**Tabla 5.** Proporciones y peso de las muestras originales para formar los compósitos.

	Compósito 1		Compósito 2		Compósito 3		Compósito 4		Compósito 5	
<b>Peso total (kg)</b>	30		30		30		30		30	
<b>PESO (kg)</b>	ACO	30	ACO	22.5	ACO	15	ACO	7.5	ACO	0
	BCO	0	BCO	7.5	BCO	15	BCO	22.5	BCO	30
<b>% PESO</b>	ACO	100	ACO	75	ACO	50	ACO	25	ACO	0
	BCO	0	BCO	25	BCO	50	BCO	75	BCO	100

**Tabla 6.** Proporciones establecidas de las muestras para formar los compósitos minerales.

Muestra	Compósito 1	Compósito 2	Compósito 3	Compósito 4	Compósito 5
1	100%	75%	50%	25%	0%
2	0%	25%	50%	75%	100%

### 3.4. METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA

#### 3.4.1. Láminas petrográficas

##### Petrografía

La petrografía es utilizada para determinar los arreglos minerales, estructurales y texturales de los minerales formadores de roca y de valor, a partir de las propiedades ópticas de cada especie, al hacer incidir y atravesar luz natural (en todas direcciones) y luz polarizada (unidireccional) en un corte delgado de roca. Durante la caracterización fue utilizado un microscopio vertical de luz polarizada Olympus BX41.

Las muestras de mano separadas previo a la etapa de trituración, fueron cortadas perpendiculares a las estructuras visualizadas a simple vista para lograr una observación transversal. Las muestras fueron desbastadas con polvos de carburo de silicio de diferente tamaño de grano, para alisar y dar brillo a la superficie que se desea analizar. Posteriormente, fue pegada la superficie de la roca a un portaobjetos petrográfico utilizando bálsamo de canada, una resina



especial que evita interferencias en la reflectancia de los minerales. Finalmente, al estar seca la resina, se repitió la etapa de pulido hasta obtener un ancho de lámina <1 mm.

Estas láminas delgadas fueron utilizadas para detallar la petrografía en microscopio de luz transmitida (petrográfico) y de luz reflejada (mineragráfico), así como determinar el carbón orgánico por medio del microscopio electrónico de barrido (MEB), al recubrir las láminas con partículas de oro, para poder distinguir el carbón en la muestra.

### **Mineragrafía**

Cada mineral opaco tiene propiedades ópticas con las cuales se pueden identificar, es por esto que se utilizó esta técnica para caracterizar los minerales de mena de la muestra ACO y BCO. Por lo tanto, utilizamos las láminas petrográficas y fueron observadas en un microscopio de luz reflejada en las cuales se identificaron diferentes minerales de valor económico. El equipo utilizado fue un microscopio marca Nikon modelo Eclipse LV100N POL.

#### **3.4.2. Análisis químicos**

El análisis químico es necesario para cuantificar el contenido de elementos de valor en las muestras minerales. El análisis se llevó a cabo a una muestra sólida en polvo de tamaño de partícula aproximado de 150  $\mu\text{m}$  (-malla 100) a partir de un proceso denominado digestión ácida que conlleva un ataque de ácido clorhídrico y ácido nítrico a una relación 3:1 (agua regia) respectivamente, en placa caliente, para llevar a cabo más rápidamente las reacciones químicas. La solución resultante fue analizada con un espectrómetro de absorción atómica Perkin Elmer Analyst modelo 3110.

Los cinco compósitos, así como los productos de las pruebas de flotación, fueron analizados por duplicado para obtener una ley promedio de cabeza, de los elementos Pb, Cu, Zn, Fe, As y Sb.

### 3.4.3. Difracción de rayos X

La difracción de rayos X es una técnica de caracterización de minerales, que trabaja con la estructura cristalina de los materiales. Cada fase cristalina presenta un patrón único que depende de su estructura. Esta técnica permite identificar plenamente una fase cristalina y es posible cuantificar dentro de ciertos límites de detección y cuando se han diseñado estándares de referencia en casos específicos. Los rayos x con longitud constante, las ondas y los difractados están en fase, cuando los átomos están en estructuras simétricas. Si están desordenados, los rayos difractados no estarían en fase y no tendrían salida.

El resultado de la difracción de rayos X de polvos, fue un difractograma, que es una gráfica donde en la abscisa se indica el ángulo de difracción y en la ordenada la intensidad correspondiente de la señal. La identificación consiste en hallar en la base de datos el mineral correspondiente a dicho parámetros, por comparación con los patrones de difracción (PDF, por las siglas en inglés de powder diffraction file).

Las muestras ACO y BCO fueron analizadas por este método en el equipo difractómetro de rayos X marca Bruker® modelo D8 Advance Davinci, para determinar las especies minerales que contienen, identificando principalmente las especies de ganga y semicuantificarlas. Los compósitos intermedios no se analizaron debido a que son la mezcla de estas dos.

#### **3.4.4. Microscopía electrónica de barrido**

El microscopio electrónico de barrido (MEB), es una técnica de microscopía electrónica capaz de obtener imágenes de la superficie de la muestra, usando la interacción electrón-materia en lugar de un haz de luz. La potencia del MEB alcanza los 300,000x, pero lo ideal es que no rebase los 100,000x para obtener imágenes de gran calidad.

Durante el análisis de las fases minerales en los diferentes compósitos se utilizó espectroscopía de rayos X por energía dispersiva (EDS) acoplado al MEB. El resultado fue la identificación de la composición de los minerales de valor, ganga, materia carbonosa de manera puntual y precisa, usando como muestra las láminas delgadas utilizadas previamente para la realización de la petrografía, a las cuales se recubrieron con partículas de oro con la finalidad de hacer conductora a la muestra y determinar el porcentaje de carbono de la materia carbonosa en el análisis puntual. Además, se realizará una caracterización general por el presente método, a dos briquetas, una de ellas con la muestra ACO y la segunda con la muestra BCO, a tamaño de partícula 80% menos malla 80 y recubiertas con partículas de carbón.

El equipo utilizado para los propósitos mencionados previamente es un microscopio electrónico de barrido marca JEOL® modelo JSM-6610LUV, equipado con un detector de energía dispersa de rayos X (EDS) marca FORD, modelo X-Max.

### **3.5. SELECCIÓN DE PROPIEDADES GEOLÓGICAS**

Posterior a la caracterización mineralógica determinaremos las propiedades geológicas útiles para lograr establecer una correlación con la respuesta metalúrgica. Las propiedades

previamente identificadas mediante la revisión bibliográfica definen al contenido de materia carbonosa como un agente nocivo para los procesos metalúrgicos, por lo cual el análisis del contenido de materia carbonosa se realizará a través de un determinador de carbono orgánico LECO, y serán llevado a cabo los experimentos necesarios en el laboratorio de la planta.

El grado de alteración o el cambio en la mineralogía original de la roca será identificado por medio de la petrografía, donde se detallará las relaciones y el grado de ésta, por medio del contenido de minerales de alteración.

### 3.6. PRUEBAS METALÚRGICAS

#### 3.6.1. Granulometría de cabeza

El análisis granulométrico es indispensable para conocer el tamaño de las partículas y su distribución en la muestra. Para llevar a cabo este análisis, fueron utilizados tamices analíticos ASTM, con distinta apertura de poro para clasificar correctamente las partículas minerales.

**Tabla 7.** Mallas seleccionadas para realizar el análisis granulométrico

Nº Malla ASTM	Apertura (µm)
10	2000
14	1410
18	1000
30	595
40	400
50	297
60	250
80	177
120	125
170	88
230	63
325	44

Durante este proceso trabajamos con material limpio y seco, con la finalidad de evitar la humedad en la muestra y se formaran grumos que pudieran sesgar los resultados finales. Utilizamos un equipo RO-TAP modelo RX-29 donde se le asignó un tiempo de trabajo de 5 minutos con la finalidad de que los resultados fueran lo más certeros posibles. Los resultados del análisis serán graficados para obtener las curvas granulométricas, esperando una distribución similar en los diferentes compósitos.

### 3.6.2. Cinética de molienda

La molienda es una etapa importante dentro de la reducción del tamaño de las partículas minerales, debido a que con este proceso se obtiene un tamaño adecuado para liberar las especies de valor y sean beneficiadas posteriormente en la etapa de flotación. La cinética de molienda se realiza variando el tiempo de residencia del mineral en el molino, para posteriormente realizar un análisis granulométrico en húmedo, obteniendo una distribución de tamaño de partículas diferente al material de alimentación. Durante el presente trabajo se utilizó un molino de bolas estandarizado, que consta de un cilindro de acero de 27 cm de largo y 20.5 cm de diámetro en donde a su interior se introdujo un collar de bolas de 11.75 kg, componiéndose por esferas de hierro de los siguientes diámetros (Tabla 8).

**Tabla 8.** Distribución de tamaño de bolas utilizadas en la cinética de molienda

Tamaño (pulgadas)	Nº de bolas
1 1/2	10
1 1/4	36
1	54
3/4	21
5/8	21
1/2	30
total	172

Cada compósito fue molido al 60% de sólidos, es decir, por cada kilogramo de material se le añadió 660 mililitros de agua y los tiempos de residencia del mineral dentro del molino fueron 5, 10 y 15 minutos. A la pulpa resultante se le realizó un análisis granulométrico en húmedo, que consiste en pasar la pulpa por las mallas previamente mencionadas agregando un flujo de agua, evitando la formación de grumos de partículas finas. El resultado de las distribuciones granulométricas a los diferentes tiempos indica la respuesta del mineral a ser molido.

El P80 utilizado en la compañía minera es de 120  $\mu\text{m}$  aproximadamente, lo cual el análisis de cinética de molienda se centra principalmente en la distribución granulométrica que va de la malla +60, +80, +120, +170, +230 y +325, para graficar el porcentaje acumulado negativo respecto al tiempo de residencia en el molino. Con esto se logra observar el tiempo necesario para reducir de tamaño más del 80 % del mineral a la fracción deseada.

### **3.6.3. Pruebas de flotación**

En el presente proyecto realizamos una serie de pruebas de flotación para la recuperación de los metales de valor, teniendo como variante el tratamiento previo a estas, para retirar parcialmente la materia carbonosa y determinar las diferencias en el comportamiento de la recuperación de sulfuros, evaluado con un mismo cuadro de reactivos y añadiendo la misma dosificación. Los resultados fueron comparados con la respuesta de una flotación simple plomo-zinc (ST)

La celda utilizada para llevar a cabo las pruebas previamente mencionadas, es una celda de flotación Denver marca METSO® serie D12V-033, con un recipiente de 3 litros, flujo de aire por succión y una velocidad de agitación constante de 1200 rpm (Figura 13).



Figura 13. Celda de flotación Denver de la marca METSO.

### Flotación plomo-zinc sin remoción de materia carbonosa (SR)

Este proceso conlleva una flotación sin ningún tratamiento previo a esta, es decir, la pulpa resultante de la molienda se lleva a la celda directamente y se le añaden los reactivos, obteniendo como resultado dos concentrados, uno de plomo y otro de zinc; el concentrado de plomo es resultado de la etapa primario y agotativo de plomo; y el concentrado de zinc, del primario y agotativo de zinc (Figura 14).

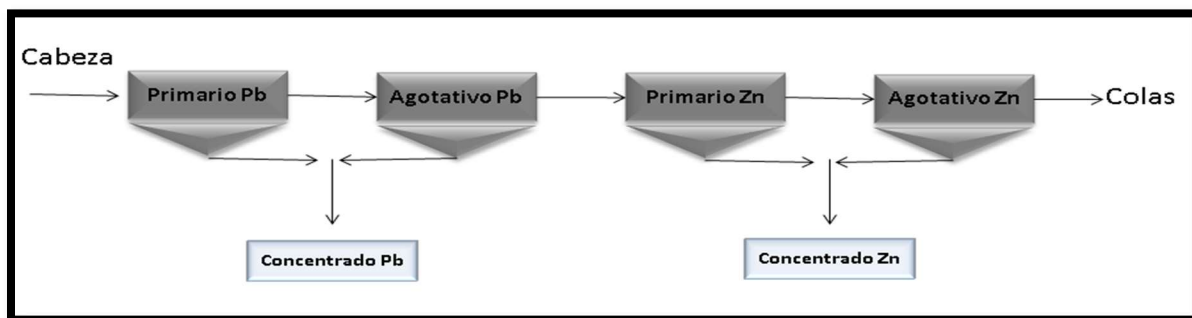


Figura 14. Diagrama de flujo de una flotación plomo-zinc sin remoción previa de carbón.

## Flotación plomo-zinc con pre-flotación de materia carbonosa (Remoción fisicoquímica, RFQ)

Esta flotación utiliza como tratamiento previo una flotación primaria de carbón, y que debido a la hidrofobicidad natural de este mineral es necesario añadir el espumante en esta etapa para promover la generación de burbujas, obteniendo como resultado un concentrado con contenido de materia carbonosa. Posterior a la etapa de pre-flotación se lleva a cabo la flotación simple como previamente se mencionó (Figura 15).

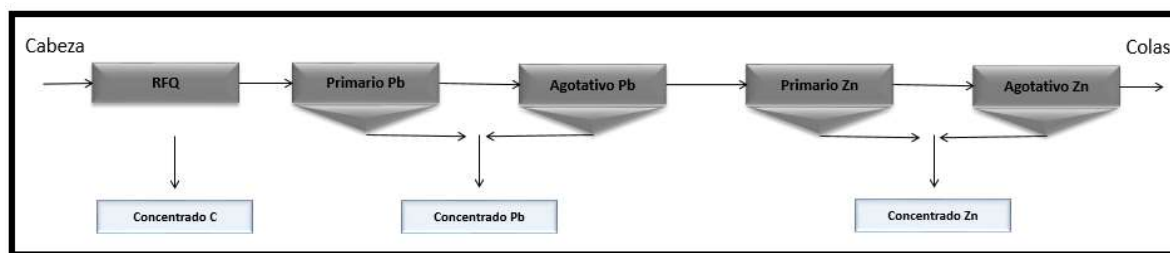
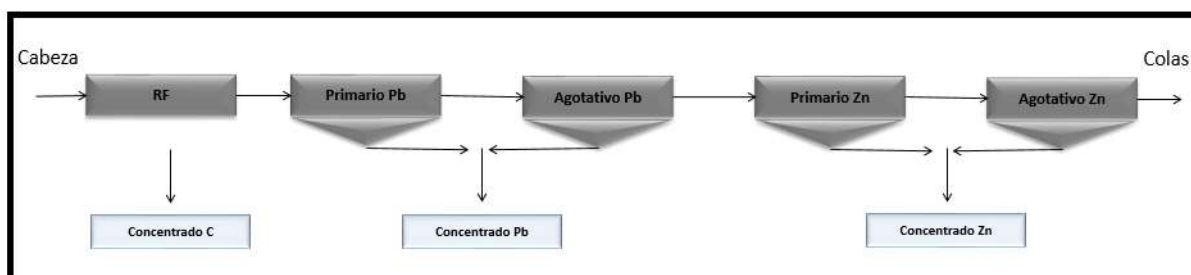


Figura 15. Diagrama de flujo de una flotación plomo-zinc con remoción fisicoquímica del carbón.

## Flotación plomo-zinc con pre-flotación de remoción física (RF)

Este proceso conlleva previo a la flotación de metales de valor, un método para retirar la materia carbonosa, que consta de poner en contacto la pulpa con una superficie hidrofóbica (placa de acrílico) para retirar mecánicamente la materia carbonosa utilizando la interacción física entre el acrílico y el carbón (adhesión de la materia carbonosa), evitando así añadir reactivos adicionales a la pulpa (Figura 16).





**Figura 16.** Diagrama de flujo de una flotación plomo-zinc con remoción física del carbón.

Los reactivos utilizados en la flotación de metales de valor, así como su dosificación fue proporcionada por la unidad minera que facilitó las muestras. Fueron utilizados espumantes, colectores y modificadores, los cuales se describen en la tabla 9.

**Tabla 9.** Reactivos utilizados en la flotación plomo-zinc y su descripción.

Reactivo	Efecto	Descripción
F-181	Espumante	Espumante a base de mezclas de alcohol y glicol
SIPX	Colector	Reactivo de mayor selectividad por su corta cadena carbonada. Usado generalmente en menas complejas de plata, plomo o Zinc
Aerofina S-3418	Colector	Colector a base de fosfina desarrollado originalmente para la flotación de minerales de cobre y zinc activado y ahora reconocido por sus propiedades selectivas en minerales complejos, polimetálicos y de sulfuros masivos
Cal	Modificador	Regula el pH al hacerlo alcalino al añadir OH-
CuSO <sub>4</sub>	Activador	Es muy utilizado en los procesos metalúrgicos de minería como activador de sulfuros de Zinc, Hierro, Cobalto y Níquel. Es el re-activador más usado y económico de los sulfuros de Zinc que han sido deprimidos por los sulfatos de Zinc.
F-1234	Colector	Etil Isopropil Tionocarbamato, normalmente usado en circuitos tanto Alcalinos como ácidos que trabajan en un rango de pH desde 4 y hasta 13.

En la tabla 10 se muestra la dosificación de los reactivos para la flotación primaria de plomo se llevó a cabo añadiendo xantato isopropílico de sodio, aerofina S-3418 y espumante F-181, a un pH natural de la pulpa (7.82). No se añadió depresores de zinc en ninguna etapa de la flotación.

**Tabla 10.** Cuadro de reactivos utilizados para etapa primario de plomo.

<b>Primario Pb</b>	
pH	natural
ZnSO <sub>4</sub>	NA
NaCN	NA
Tiempo de acondicionamiento	NA
SIPX	30 g/T
Aerofina S-3418	15 g/T
Tiempo de acondicionamiento	3 min
Espumante F-181	40 g/T
Tiempo de acondicionamiento	0.5 min
Tiempo de flotación	3 min

En la tabla 11 se muestran los reactivos utilizados para la etapa agotativo de pb en donde se añadió los mismos reactivos que la flotación primaria de Pb, pero al 50% a pH natural de la pulpa (7.82).

**Tabla 11.** Cuadro de reactivos utilizados para etapa agotativo de plomo.

<b>Agotativo Pb</b>	
pH	Natural
SIPX	15 g/T
Aerofina S-3418	7.5 g/T
Tiempo de acondicionamiento	1 min
Espumante F-181	20 g/T
Tiempo de acondicionamiento	0.5 min
Tiempo de flotación	2 min

En la tabla 12 se muestran los reactivos utilizados para la flotación primaria de Zn, se elevó el pH a 10.5, para posteriormente añadir sulfato de cobre como activador de zinc, colector F-1234 y espumante F-181.

**Tabla 12.** Cuadro de reactivos utilizados para etapa primario de zinc.

<b>Primario Zn</b>	
pH	10.5
Cal	0.52 g
CuSO4	100 g/T
Tiempo de acondicionamiento	5 min
Colector F-1234	20 g/T
Tiempo de acondicionamiento	3 min
Espumante F-181	20 g/T
Tiempo de acondicionamiento	0.5 min
Tiempo de flotación	4 min

En la tabla 13 se muestran los reactivos utilizados para la etapa agotativo de zinc, se elevó el pH a 11.5, solo añadiendo colector F-1234 y espumante F-181.

**Tabla 13.** Cuadro de reactivos utilizados para etapa agotativo de zinc.

<b>Agotativo Zn</b>	
PH	11.5
cal	0.67 g
Colector F-1234	10 g/T
Tiempo de acondicionamiento	1 min
Espumante F-181	10 g/T
Tiempo de acondicionamiento	0.5 min
Tiempo de flotación	2 min

La diferencia en la dosificación entre los modelos de flotación SR y Flotación con RF, en contraste con la flotación con RFQ de materia carbonosa, es la añadidura de espumante; en las dos primeras flotaciones se añadió espumante F-181 en cada etapa del circuito y en la última mencionada, se añadió al inicio del circuito, en la pre-flotación de carbón (Tabla 14).

**Tabla 14.** Cuadro de reactivos utilizados para etapa pre-flotación de carbón en la flotación con RFQ.

<b>Pre-flotación C</b>	
Espumante F-181	100 g/T
Tiempo de acondicionamiento	0.5 min
Tiempo de flotación	2 min

Las condiciones necesarias para llevar a cabo las pruebas de flotación se definieron con base en el proceso industrial. El P80 utilizado es igual al procesado en planta 120  $\mu\text{m}$ ; el porcentaje de sólidos al cual se llevó a cabo las pruebas de flotación es al 30% lo cual nos refiere que, por cada kilo de mineral, se añadió 2,333 ml de agua; las revoluciones de la celda para lograr una turbulencia ideal fueron 1200 rpm.

Los productos obtenidos de cada una de las etapas de las diversas flotaciones que se realizaron por cada compósito, se analizaron por espectroscopía de absorción atómica (análisis químicos) para determinar las leyes de los minerales de interés, tales como Pb, Cu, Zn, Fe, As, Sb. A partir de las leyes y pesos de los productos de la flotación se realizaron balances metalúrgicos para conocer el grado y la recuperación de los metales de valor.

### **3.7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE CORRELACIÓN**

Los resultados de las pruebas metalúrgicas y las propiedades geológicas, son compilados y analizados estadísticamente con la finalidad de comprender el comportamiento de las variables y con esto formular distintas modelaciones matemáticas que puedan ser empleadas como herramientas de predicción del comportamiento metalúrgico del mineral en función de sus propiedades geológicas.

#### **3.7.1. Identificación de variables dependientes e independientes**

La palabra variable representa a aquello que varía o presenta algún cambio. Siguiendo este sentido, una variable geológica es una propiedad intrínseca de la roca que presenta cambios homogéneos o heterogéneos tales como la mineralogía, estructuras, texturas o de alteración mineral, que directa o indirectamente pueden cambiar el comportamiento de la roca al momento del beneficio metalúrgico.

En el presente trabajo se identificaron variables independientes, las cuales son aquellas que no dependen de otra variable para determinar su comportamiento (variables geológicas). Y las variables dependientes son aquellas que dependen de otra variable que determina su comportamiento (variables metalúrgicas).

### 3.7.2. Covarianza entre variables

La covarianza es el valor que refleja en que cuantía de dos variables aleatorias varían de forma conjunta respecto a sus medidas, Es decir, expresa las relaciones entre dos variables mediante una ecuación matemática:

$$Cov(X, Y) = \frac{\sum_1^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{n}$$

La covarianza es la sumatoria del producto de los valores de las variables cuando les es restada la media aritmética a cada uno; dividido entre el número total de observaciones. El cual el valor puede ser positivo, indicándonos una relación directa que define el comportamiento de la variable Y en aumento, cuando la variable X aumenta y viceversa; o negativo, representando una relación inversa la cual define que la variable Y disminuye conforme la variable X aumenta y viceversa.

### 3.7.3. Correlación de Pearson

La correlación, también conocida como coeficiente de correlación lineal (de Pearson), es una medida de regresión que pretende cuantificar el grado de variación conjunta entre dos variables. Cuantifica la dependencia lineal entre dos variables por medio de la siguiente ecuación matemática.

$$\rho_{XY} = \frac{CovXY}{\sigma_X \sigma_Y}$$

Donde el coeficiente de correlación es determinado por el valor de la covarianza dividido entre el producto de la desviación estándar de la variable X y de la variable Y.

La correlación puede tomar un valor entre -1 y 1 donde el signo positivo o negativo indica el tipo de relación como previamente se mencionó en la covarianza, y el valor define el grado en las cuales esta correlacionadas las variables, siendo 1 y -1 una correlación perfecta y el valor de 0 indica que no existe correlación. Este análisis es necesario para definir la afinidad que tiene la respuesta metalúrgica con cada una de las variables estudiadas y determinar el ajuste de un modelo matemático.

#### 3.7.4. Regresión lineal múltiple

La relación lineal múltiple ajusta modelos lineales entre variable dependiente y más de una variable independiente, es decir se analiza el cambio de la variable dependiente a partir de los cambios de las variables independientes analizadas. Al llevar a cabo una regresión lineal múltiple se genera un plano de respuesta en el espacio tridimensional, en el cual el valor de la variable dependiente es la diferencia de altura del punto generado entre las variables independientes y la intersección con el plano (Figura 15). La ecuación generada por la regresión lineal múltiple se muestra a continuación:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n$$

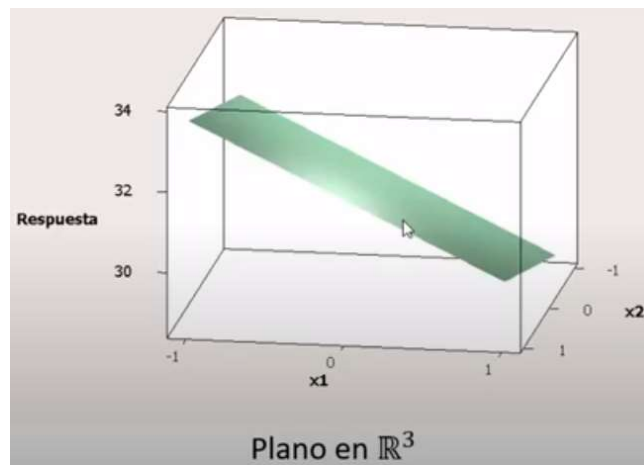
Donde:

y= Respuesta variable dependiente

$\beta_0$ = intercepto

$X_1$  y  $X_2$  = Variables independientes

$\beta_1$  y  $\beta_2$  = Parámetros (coeficientes de regresión)



**Figura 17.** Representación gráfica tridimensional de un plano que representa un modelo multivariado.



---

## 4. RESULTADOS DEL EFECTO DE LA MATERIA CARBONOSA EN LA RECUPERACIÓN DE PLOMO-ZINC

---

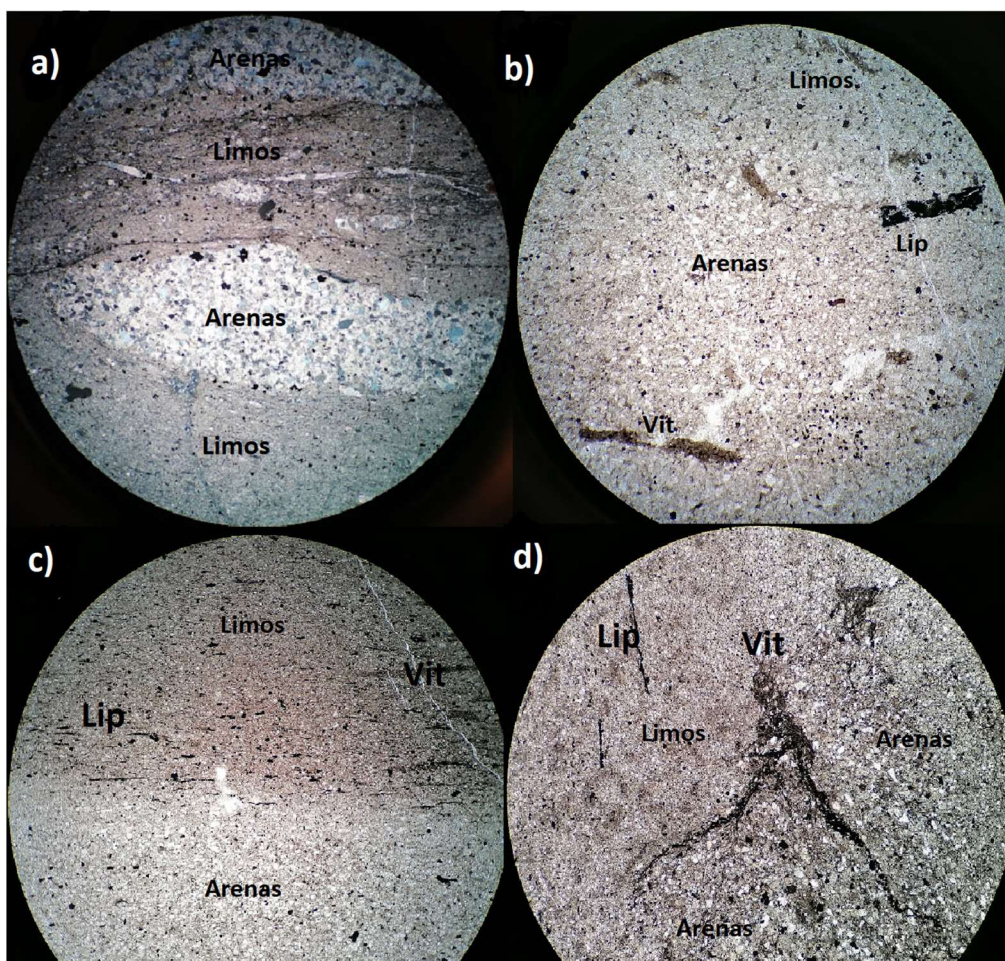
### 4.1. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA

#### 4.1.1. Descripción petrográfica de las muestras

##### **Petrografía muestra ACO**

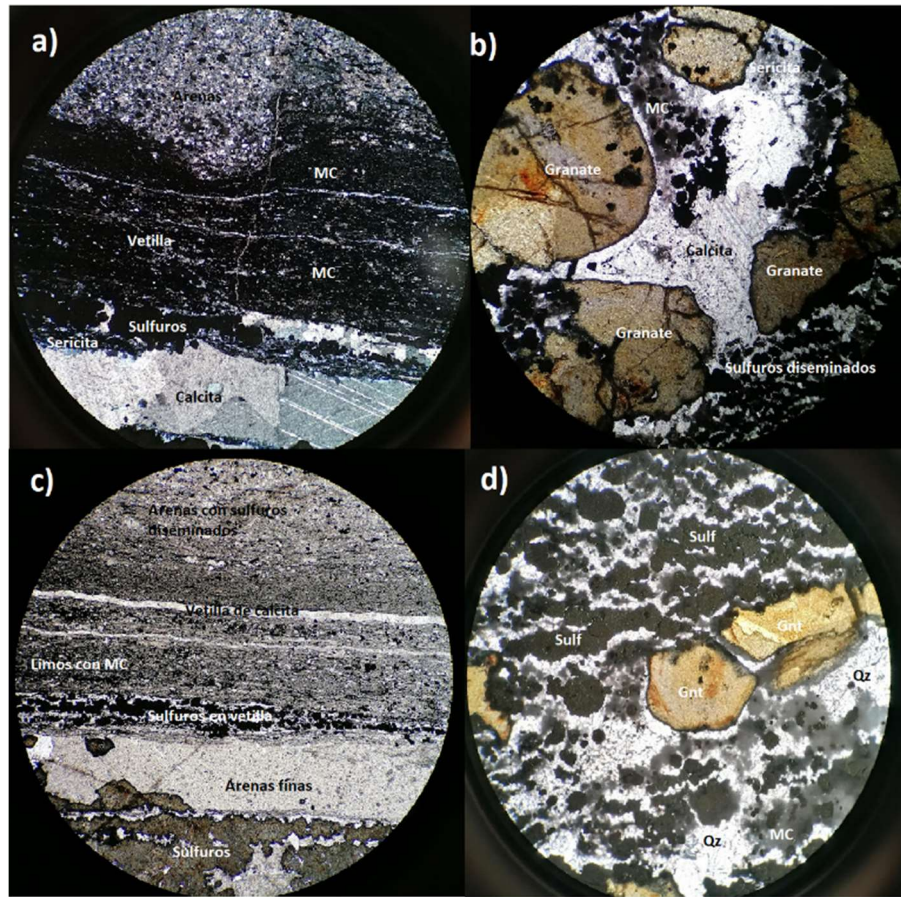
Roca compuesta de arena feldespática de granos angulosos intercalados con limos. Presenta una estructura laminar en donde la mayor parte de la materia carbonosa (MC) contenida sigue controles litológicos, especialmente en la transición arena-limos; y un control estructural generado por los procesos geotectónico regionales, además de las deformaciones generadas en las rocas, debido al emplazamiento del sistema plutónico, por lo que se puede localizar paralelamente a las fracturas y estructuras deformadas, migrando de su posición original y cambiando su orientación. Presenta una alteración filica débil, debido a la presencia de la relación mineral cuarzo + pirita + sericita, en una relación cuarzo > sericita > pirita con presencia de ortoclasa hidrotermal, con una sobreimpresión de calcita y epidota por efecto retrogrado del sistema (tabla 15).

Los macerales fueron determinados debido al grado de reflectancia que poseen, encontrando liptinita como el maceral más abundante, presentándose con un color gris oscuro a negro; y vitrinita presentándose con un color gris oscuro a gris claro con texturas reliquia de fragmentos orgánicos. Las laminaciones paralelas indican corrientes laminares y la gradación arcilla -arena indica aporte diferencial de sedimentos de distintos diámetros a través del tiempo.



**Figura 18.** Fotomicrografía tomada a microscopio óptico de luz transmitida a una lámina delgada para describir la litología de las muestras.

La siguiente descripción corresponde a lo observado en la figura 18: a) Alternancia rítmica de arenas y limos con estructura de laminación paralela, donde los limos contienen preferentemente la materia orgánica. b) Macerales observados de forma tabular en el cual se diferencian en coloración determinando el maceral más abundante a la liptinita y en segundo lugar la vitrinita. c) contacto entre limos y arenas donde se observa la laminación paralela y la predominancia de materia orgánica en los limos. d) contacto entre limos y arenas en el cual se encuentra materia orgánica la cual sigue un control litológico y estructural.



**Figura 19.** Fotomicrografía tomada de una vetilla de la muestra ACO, en un microscopio óptico de luz transmitida.

Es observado en la figura 19: a) Vena rellena de calcita anhedral la cual está en contacto con una zona de abundante materia carbonosa y por encima se localiza una zona de arenas que muestra estructura de sobrecarga. b) en la vetilla se observaron granates, calcita como matriz y materia carbonosa. c) sección de una vetilla en el cual se observa una mineralización masiva en la parte inferior y en la parte superior una mineralización diseminada, la materia carbonosa se encuentra preferentemente en la zona de limos como previamente se ha mencionado. d) Granates soportados por calcita en el cual se observa la presencia de materia carbonosa y sulfuros diseminados.

**Tabla 15.** Descripción y porcentajes de minerales observados en microscopio petrográfico de la muestra ACO.

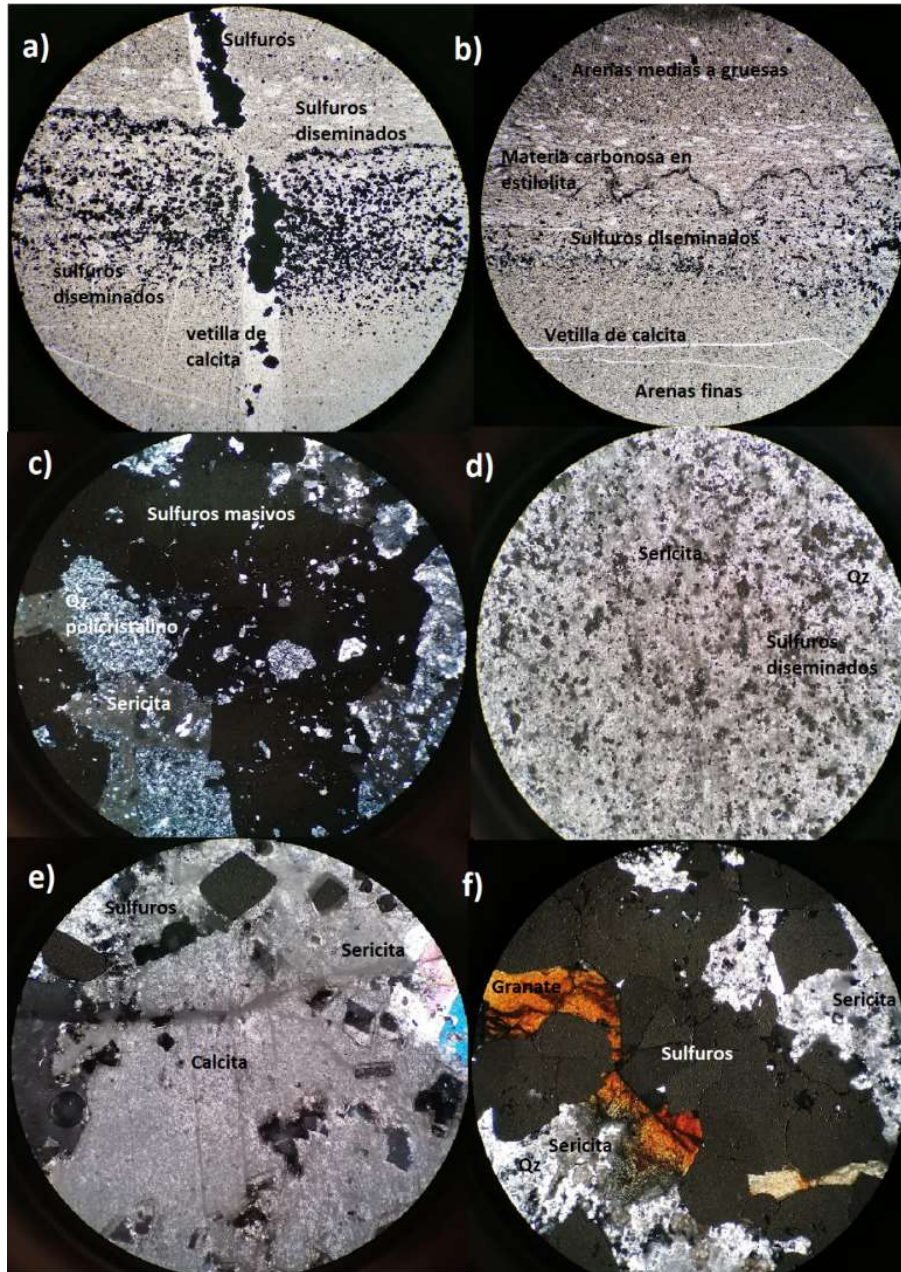
<b>Mineral</b>	<b>%</b>	<b>Observaciones</b>
Ortoclasa	40	Cristales fracturados debido al transporte y sedimentación
Calcita	25	Diseminada en masa basal y en relleno de fracturas
Cuarzo	15	Localizado en masa basal y encontrado como cristales fracturados
Sericita	10	Cristales finos diseminados
Pirita	5	Cristales eudrales, diseminados en la muestra
M.C.	5	Encontrada con una orientación preferencial a la laminación de la roca, y paralelamente a fracturas siguiendo un control estructural y litológico
Epidota	<1	Se encuentra diseminada en la muestra

### **Petrografía BCO**

Roca sedimentaria clástica criptocristalina que presenta una alteración filica pervasiva debido a que la sericita, la pirita y el cuarzo se encuentra en abundancia, siguiendo la relación pirita > sericita > cuarzo, lo cual originó una decoloración debido a la destrucción de la materia carbonosa (decarbonación) que originalmente contenía la roca. Presenta una silicificación que origina el aumento de dureza en la roca y un fracturamiento concoide; finalmente esta alteración también genera oxidación de los minerales de hierro principalmente pirita, formando hidróxidos de hierro como jarosita y presencia de granate andradita, lo cual determina un ambiente de formación de alta temperatura. Presenta texturas mineralógicas de reemplazamiento, donde la pirita originada por la alteración filica reemplaza a la esfalerita siguiendo un control estructural en mantos y entre ellos se encuentra calcita con presencia de inclusiones fluidas saturadas de cristales de sal, agua y burbujas de gas. La materia carbonosa se comporta como materia plástica que quedó atrapada en estructuras como estilolitas que la protegieron de la decarbonación que generan los fluidos hidrotermales propios al enriquecimiento de la mineralización de valor. Las estructuras



mineralizadas son en vetillas rellenas de sulfuros y cuarzo, así como minerales diseminados de grano fino que se encuentran en zonas de deformación diagenética (Tabla 16).



**Figura 20.** Fotomicrografía tomada a la muestra BCO observadas en sección delgada en un microscopio óptico de luz transmitida.

La descripción de la figura 20 es la siguiente: a) Vena de calcita en el cual contiene sulfuros masivos y enriquecimiento horizontal de sulfuros diseminados. b) Estilolita rellena de materia carbonosa, muestra los rastros de la materia carbonosa que se mantuvo atrapada en estructuras generadas por esfuerzos tectónicos. c) Sulfuros masivos subhedrales soportados por cuarzo policristalino y sericita. d) principalmente se muestra sericita, sulfuros diseminados y cuarzo en la litología de la roca encajonante. e) Existen vetillas con presencia de calcita como matriz y con presencia de cristales de sulfuros eudrales. f) Se localizaron granates en las vetillas de calcita junto a sulfuros subhedrales, sericita y cuarzo.

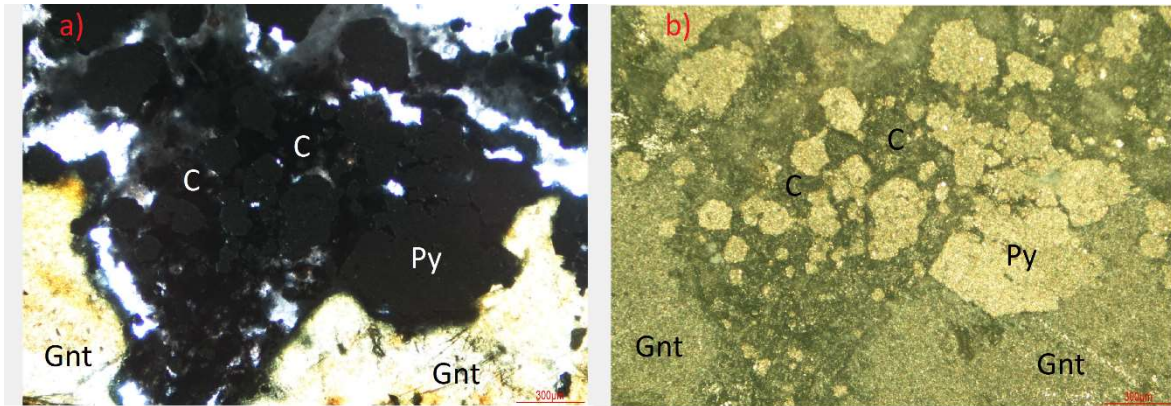
**Tabla 16.** Descripción y porcentaje observados en el microscopio petrográfico de la muestra BCO.

<b>Mineral</b>	<b>%</b>	<b>Observaciones</b>
Cuarzo	25	Cuarzo policristalino anhedral
Pirita	20	Pirita sub-anhedral
Sericita	20	Se encuentra diseminada en toda la muestra
Calcita	10	Calcita sobreimpresa a los minerales formadores de roca
Ortoclasa	25	Localizadas en la masa basal

#### 4.1.2. Identificación de minerales opacos mediante minerografía

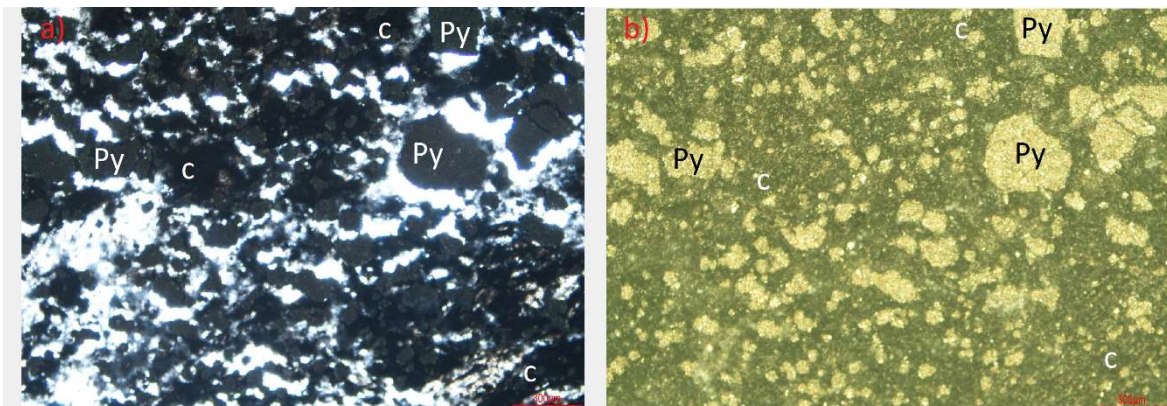
##### **Minerografía ACO**

Con esta técnica analizamos el contenido de materia carbonosa comparando la microscopía óptica de luz reflejada con la microscopía de luz transmitida, para esto se utilizó el mismo microscopio óptico que trabaja en las dos modalidades y en el mismo campo óptico se tomaron fotografías para posteriormente compararlas identificando las zonas donde existe la materia carbonosa, los minerales de valor y de ganga (Figura 21 y 22).



**Figura 21.** A la izquierda se muestra una fotomicrografía de una vetilla de la muestra ACO en un microscopio con luz transmitida. A la derecha se muestra la misma zona analizada, utilizando luz reflejada.

a) Campo visual de la muestra ACO con luz transmitida en donde se identifican fragmentos de granates (Gnt), partículas isotrópicas, las cuales prohíben el paso de la luz en ellas. b) Campo visual de la muestra ACO con luz reflejada observándose una asociación simple entre el granate y una partícula subhedral de pirita (Py) y en los espacios anulares de las piritas anhedrales diseminadas al centro de la muestra se determina como materia carbonosa (C).



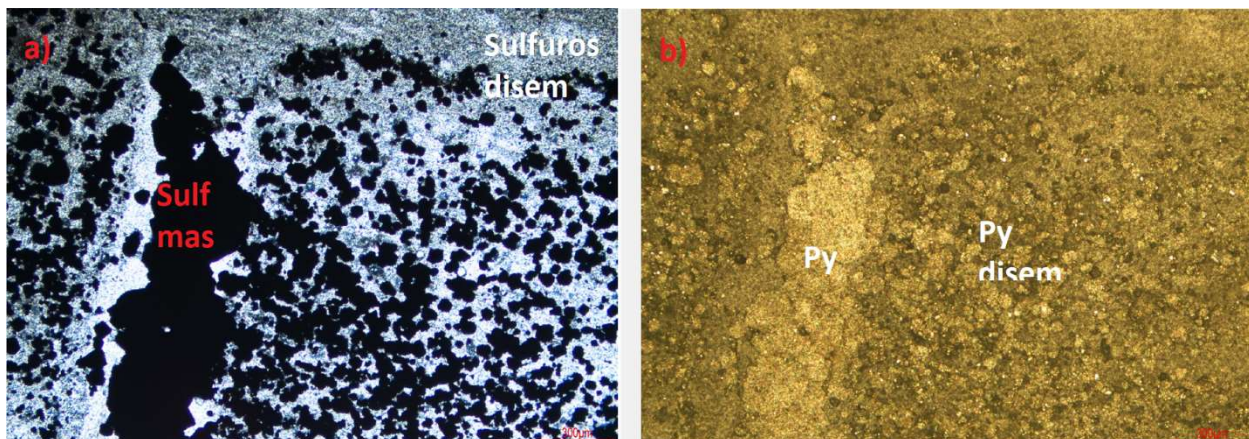
**Figura 22.** Fotomicrografía de la muestra ACO observada en un microscopio con luz transmitida. A la derecha se muestra la misma zona analizada, utilizando luz reflejada.



a) En el campo visual se observan minerales isotrópicos que prohíben el paso de la luz, entre ellos minerales de valor y ganga, así como materia carbonosa (C) que se distingue por tener un color más oscuro a diferencia de las partículas gris oscuro. b) En el campo visual se observa partículas de pirita (Py) anhedral diseminadas sin ninguna asociación con otros minerales de valor. Se confirma la existencia de la materia carbonosa (C) en las zonas anulares de la pirita diseminada.

### Minerografía BCO

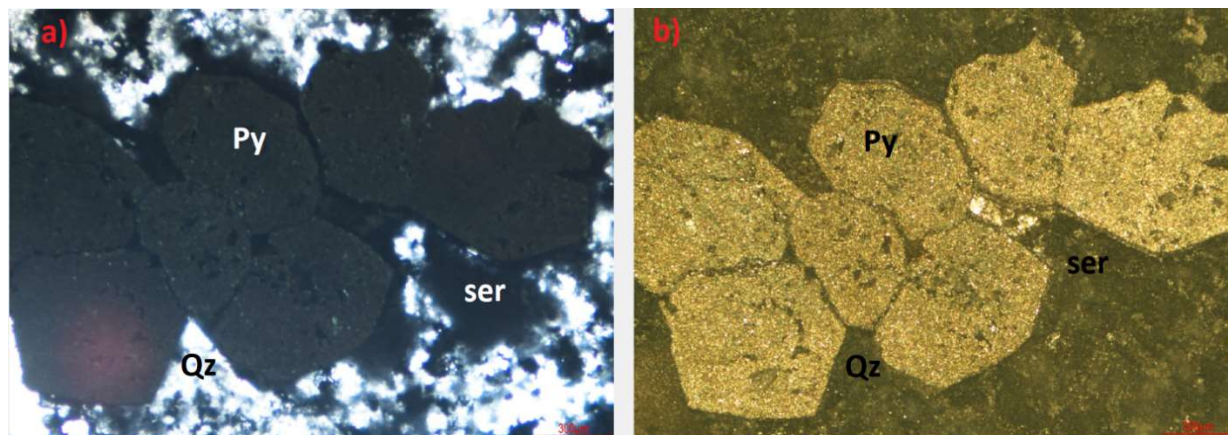
Para la muestra BCO se analizó con la minerografía los tipos de sulfuros más comunes en la muestra, encontrándose en abundancia a la pirita en forma diseminada soportados en cuarzo policristalino y sericita; de forma masiva, se encontraron piritas de sub a eudrales, principalmente en vetillas soportadas por calcita. Los sulfuros principalmente fueron localizados en franjas alrededor de estilolitas lo que supone que esta zona fue enriquecida debido a los esfuerzos generados durante la preparación de la roca a ser mineralizada (Figura 23 y 24).



**Figura 23.** A la izquierda se muestra una fotomicrografía de una vena de la muestra BCO con luz transmitida, a la derecha se muestra la misma zona con luz reflejada.



a) Se muestra la estructura vetilla propia de un sistema *stockworks* con relleno de calcita que soporta a sulfuros masivos euhedrales. b) Fue identificada pirita bien formada y una zona de piritas anhedrales diseminadas por medio de minerografía de luz reflejada.



**Figura 24.** Fotomicrografía de una pirita masiva.

a) Se observan bajo luz natural transmitida sulfuros masivos eudrales soportados por una matriz de cuarzo y sericita b) Se aprecia con la luz reflejada la especie mineral pirita eudral lo cual comprueba la asociación de los minerales de alteración filica QSP.

#### 4.1.3. Análisis químico de los compósitos minerales

A cada compósito se le realizó un análisis químico por triplicado para determinar las leyes de los elementos Pb, Zn, Cu, Fe, As y Sb. Los resultados del análisis de cabeza es el siguiente:

**Tabla 17.** Leyes de cabeza de los compósitos establecidos (% en peso).

Compósito	Pb %	Cu %	Zn %	Fe %	As %	Sb %
1	0.39	0.06	0.68	3.55	0.03	0.02
2	0.40	0.05	1.20	3.80	0.03	0.02
3	0.35	0.05	0.85	5.37	0.03	0.01
4	0.38	0.05	1.48	3.93	0.04	0.01
5	0.37	0.04	1.58	5.81	0.03	0.01

La variación principal entre el compósito 1 (ACO) y el compósito 5 (BCO) es el enriquecimiento en el elemento zinc y hierro, en cuanto a los elementos plomo, cobre, arsénico y antimonio son contenidos en cantidades similares.

El enriquecimiento de hierro en el compósito 5, es generado a partir del aumento del contenido de pirita por el tipo de alteración hidrotermal que enriqueció a la roca en pirita.

#### **4.1.4. Identificación de especies minerales y semicuantificación mediante DRX**

El análisis de difracción fue realizado para las dos muestras originales ACO y BCO, con el fin de conocer las especies minerales detectables, principalmente ganga (abundancia mayor a 4% aproximadamente) para posteriormente obtener una semicuantificación de porcentaje de estos minerales en la muestra, los cuales no son representativos para los resultados finales del proyecto

##### **DRX muestra ACO**

Las especies más abundantes corresponden a silicatos y carbonatos (Tabla 18), y en menor proporción sulfuros y óxidos. La presencia de muscovita en el difractograma refleja la presencia de sericita debido a la misma composición química, ya que la sericita es un mineral de alteración de grano fino (Figura 25).

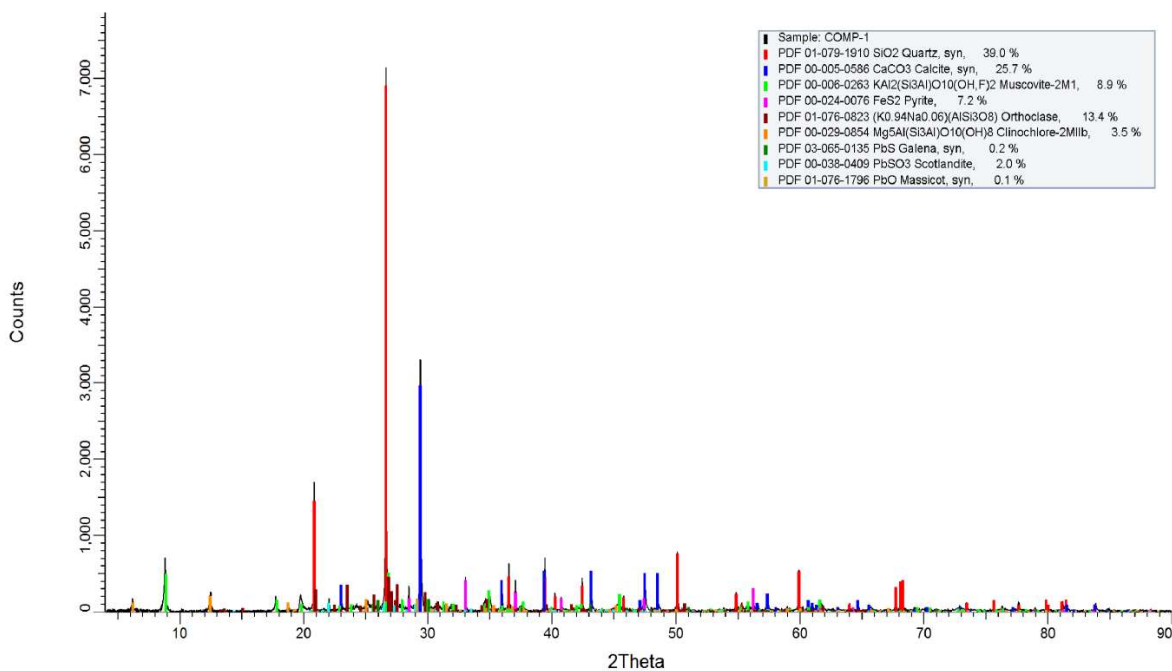


Figura 25. Difractograma de la muestra ACO.

Tabla 18. Minerales detectados por difracción de rayos X de la muestra ACO.

	Clase	Formula química	Nombre	% mineral
Minerales (ACO)	SILICATOS	SiO <sub>2</sub>	Cuarzo	39
		KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	Ortoclasa	13.4
		KAl <sub>2</sub> (AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>2</sub>	Muscovita	8.9
		(Mg,Fe <sup>2+</sup> ) <sub>5</sub> Al((OH) <sub>8</sub> /AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )	Clinocllore	3.5
	CARBONATOS	CaCO <sub>3</sub>	Calcita	25.7
	OXIDOS	PbO	Masicotita	0.1
	SULFITOS	PbSO <sub>3</sub>	Scotlandita	2
	SULFUROS	PbS	Galena	0.2
		FeS <sub>2</sub>	Pirita	7.2

## DRX muestra BCO

Los minerales más abundantes en la muestra corresponden al grupo de silicatos, carbonatos y sulfuros (Tabla 19). La presencia de muscovita hace referencia a la existencia de minerales de alteración como sericita debido a que posee la misma fórmula química pero este mineral es de

grano fino criptocrystalino. La muestra refleja abundancia de ortoclasa, cuarzo y en menor proporción calcita, por lo cual la dureza de la roca aumenta (Figura 26).

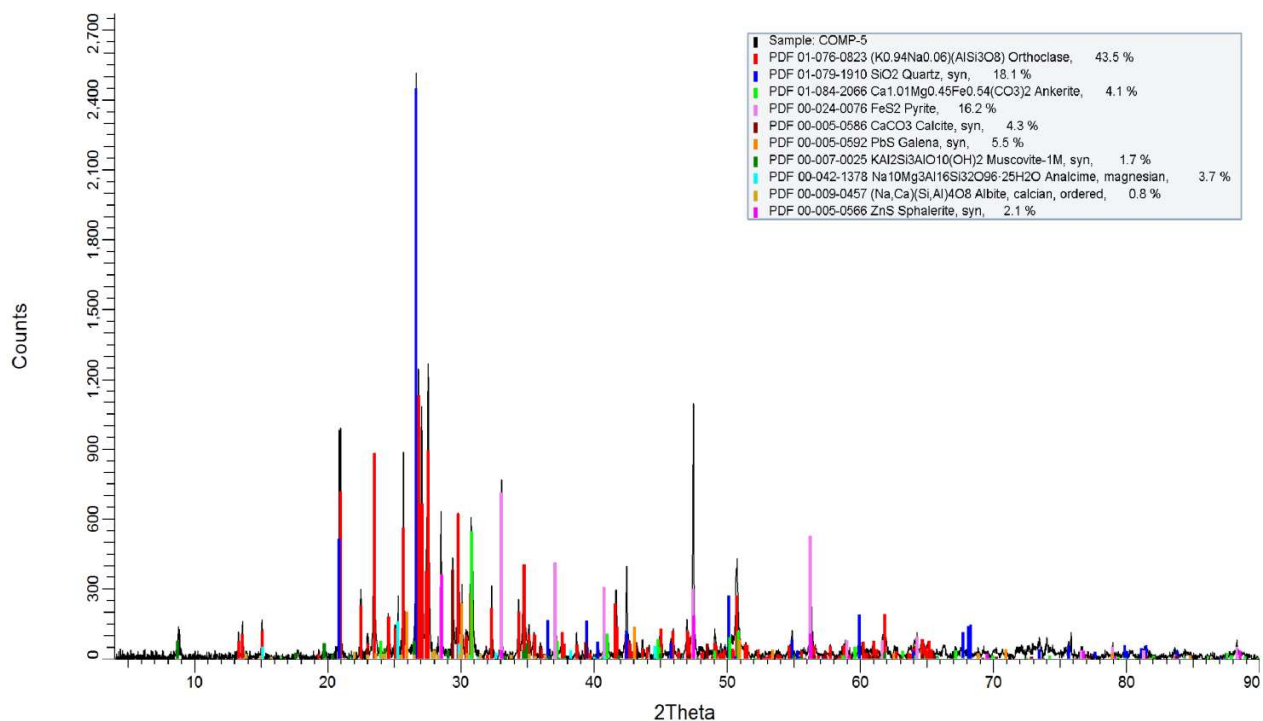


Figura 26. Difractograma muestra BCO.

Tabla 19. Minerales detectados en difracción de rayos X de la muestra BCO.

	Clase	Formula química	Nombre	% mineral
Minerales (BCO)	SILICATOS	SiO <sub>2</sub>	Cuarzo	18.1
		KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	Ortoclasa	43.5
		KAl <sub>2</sub> (AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>2</sub>	Muscovita	1.7
		NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	Albita	0.8
		Na(Si <sub>2</sub> Al)O <sub>6</sub> ·H <sub>2</sub> O	Analcima	3.7
	CARBONATOS	CaCO <sub>3</sub>	Calcita	4.3
		CaFe <sup>2+</sup> (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Ankerita	4.1
	SULFUROS	PbS	Galena	5.5
		FeS <sub>2</sub>	Pirita	16.2
		ZnS	Esfalerita	2.1

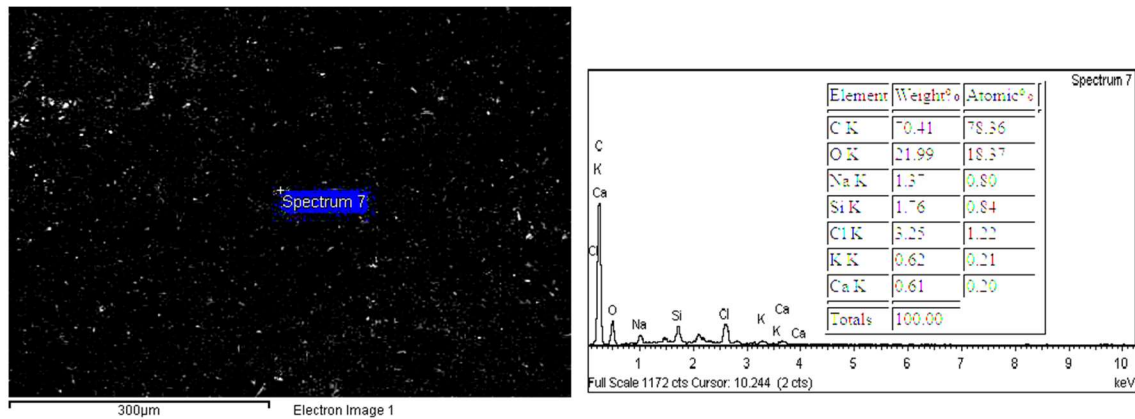
#### 4.1.5. Mapeo y microanálisis mediante MEB

La microscopía electrónica de barrido fue llevada a cabo en dos etapas; en la primera etapa fueron analizadas las láminas delgadas recubriéndolas con partículas de oro para poder observar la presencia de la materia carbonosa. Fue seleccionada una lámina delgada de la muestra ACO y otra de la muestra BCO, a las cuales les fue realizado un mapeo detectando los elementos más abundantes y con la ayuda del microanálisis se determinó la composición de especies minerales de ganga y de mena, así como la materia carbonosa. En la segunda etapa fueron analizadas briquetas con el mineral ACO y BCO con tamaño de partícula menos a malla 80, y recubiertas con partículas de carbón, con la finalidad de distinguir las especies minerales de valor y su asociación con otras partículas.

#### Microscopía electrónica de barrido lámina ACO

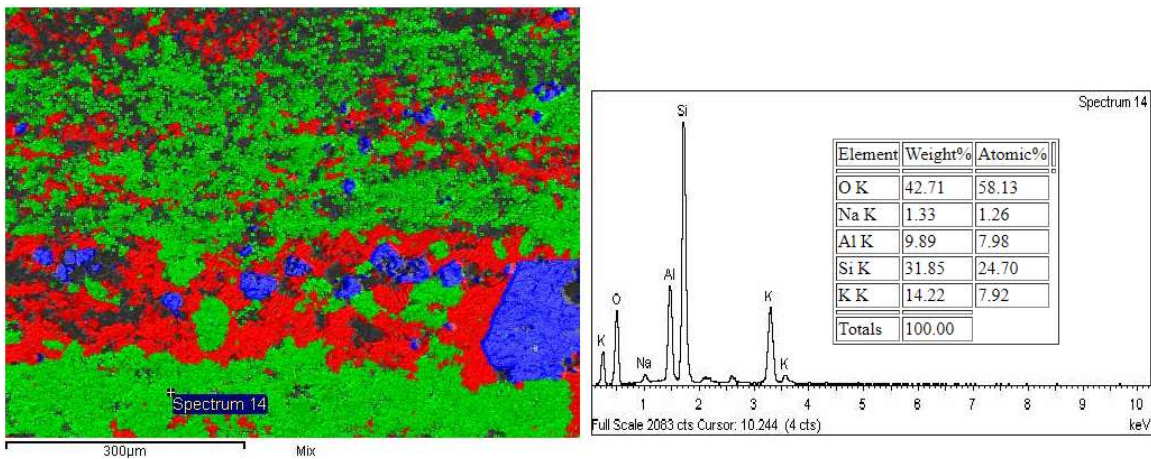
El barrido fue realizado a una zona de la lámina petrográfica de interés, lo cual se identificaron los minerales de ganga principalmente feldespatos potásicos, calcita y cuarzo mediante análisis puntual, además se identificaron zonas en donde el carbono es abundante, encontrándose disperso guardando cierta orientación de acuerdo a la laminación paralela en distintas zonas de la muestra y no viéndose relacionado con alguna fase mineral en específico.

De acuerdo al análisis puntual de las zonas enriquecidas en carbono, se determinó que la abundancia en peso es del 70% al 75% y conforme a la literatura esta proporción de carbono orgánico equivale a una especie de lignito, es decir, un carbón de bajo rango sub bituminoso con contenidos de humedad y de materiales volátiles relativos (Figura 27).



**Figura 27.** Fotomicrografía obtenida en MEB por electrones retro dispersados donde el espectro 7 identifica una zona enriquecida de carbono.

En cuanto a los minerales de ganga, el barrido detectó las concentraciones de minerales en orden de abundancia, primeramente, al feldespato en la cual en la micrografía es detectado y coloreado con el color verde, en segundo lugar, la calcita la cual es identificada con el color rojo, el cuarzo fue identificado en gránulos dispersos en la muestra en pequeñas cantidades (Figura 28, 29 y 30).



**Figura 28.** Fotomicrografía de un barrido de la muestra ACO obtenida en MEB, identifica feldespato potásico por el espectro 14.



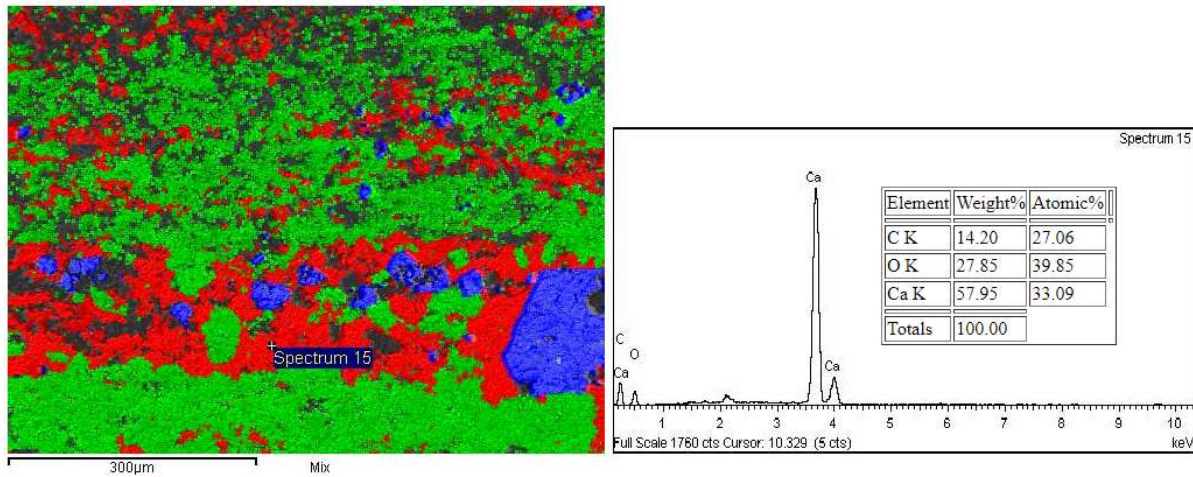


Figura 29. Fotomicrografía de un barrido de la muestra ACO obtenida en MEB, identificando calcita por el espectro

15.

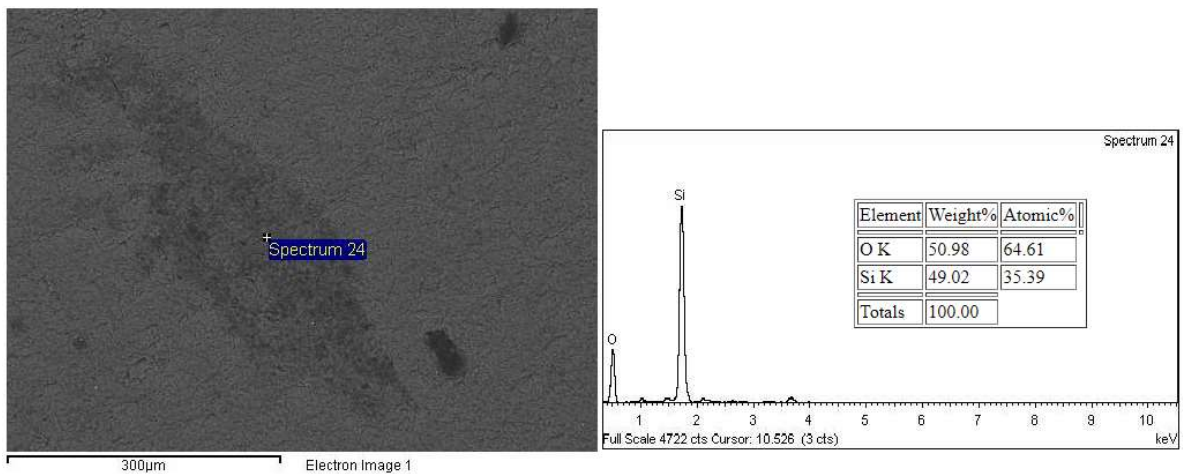
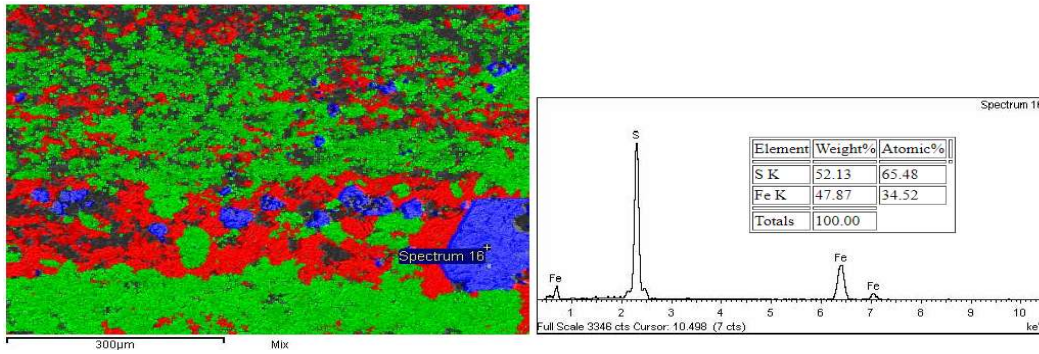


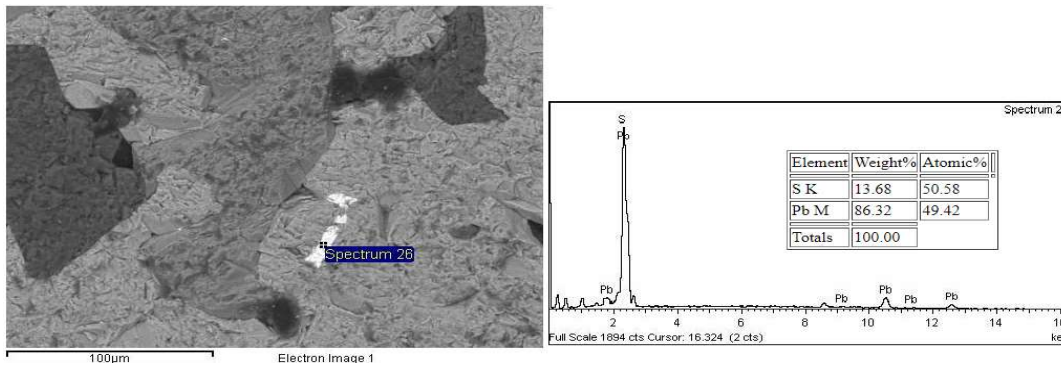
Figura 30. Fotomicrografía obtenida en MEB, identificando cuarzo por el espectro 24.

El sulfuro más abundante es la pirita demostrada en las micrografías con el color azul, en partículas muy pequeñas a relativamente grandes mayores a 200 µm de diámetro, con una distribución orientada a la laminación de la roca. La galena es poco contenida en la muestra y se encuentra asociada a otras partículas de valor como la esfalerita y liberada a un tamaño menor a

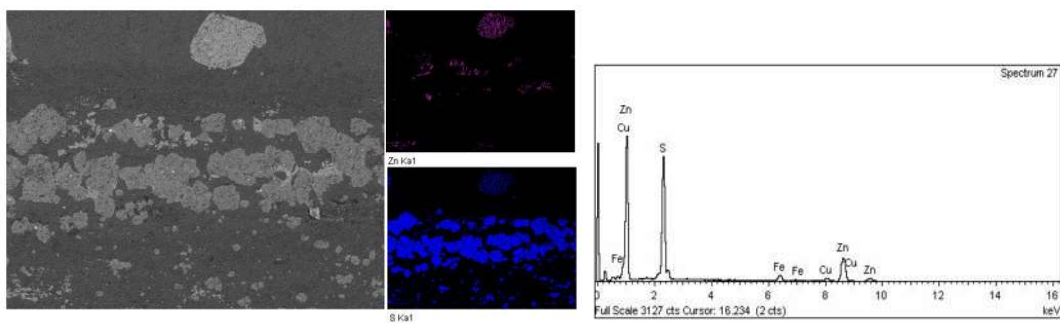
50  $\mu\text{m}$ . La mena de zinc es identificada con el color púrpura en las microfografías con tamaño de partículas mayores a 100  $\mu\text{m}$  de diámetro (Figura 31, 32 y 33).



**Figura 31.** Fotomicrografía de un barrido de la muestra ACO obtenida en MEB, identificando pirita por el espectro 16.



**Figura 32.** Fotomicrografía obtenida por MEB, identificando galena por el espectro 26.

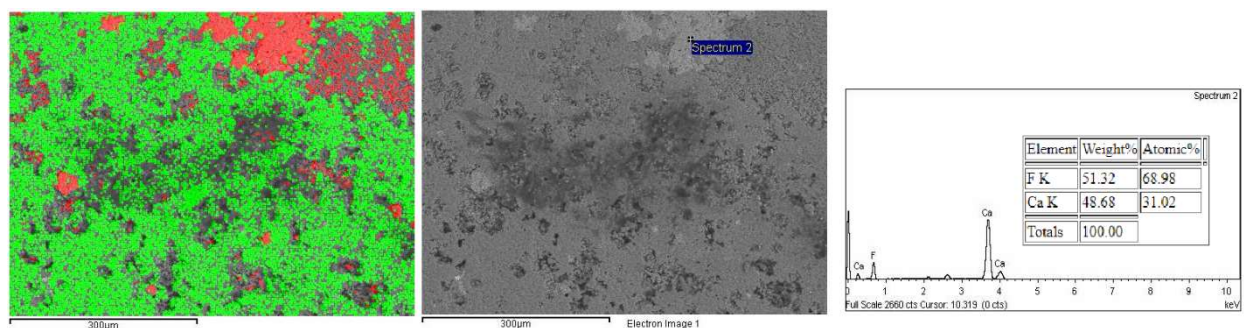


**Figura 33.** Fotomicrografía en donde se identifica esfalerita y horizontes enriquecidos de pirita.



## Microscopía electrónica de barrido lámina BCO

Las diferencias significativas entre las muestras ACO y BCO, son principalmente la transformación del feldespato potásico a sericita y la destrucción de la estructura laminar de la muestra, por lo cual se encuentran los silicatos de manera dispersa y sin orden aparente; son representados en la micrografía en color verde. Aunado a esto la materia carbonosa se redujo drásticamente, así como la calcita la cual es representada en la micrografía con el color rojo, pero es observada baja pigmentación debido a que existe otra especie mineral de calcio, siendo esta la fluorita y es agregada a la mineralogía que marca la diferencia entre ambas muestras, demostrando un cambio de mineralogía por los efectos de la alteración (Figura 34). El carbón se muestra muy tenue en pequeños manchones superficiales dispersos.



**Figura 34.** Fotomicrografía de un barrido de la muestra BCO obtenida en MEB, identificando fluorita por el espectro 2.

## Microscopía electrónica de barrido de superficies pulidas de muestra ACO

Al analizar la probeta con muestra ACO, se localizaron especies de sulfosales las cuales fueron identificadas por EDS y se definen por la presencia de arsénico y antimonio. Las sulfosales son la principal mena de plata en las muestras, presentándose de manera liberada a menos malla

80. El tamaño promedio de estas partículas es aproximadamente 100µm de diámetro en formas alargadas (Figura 35).

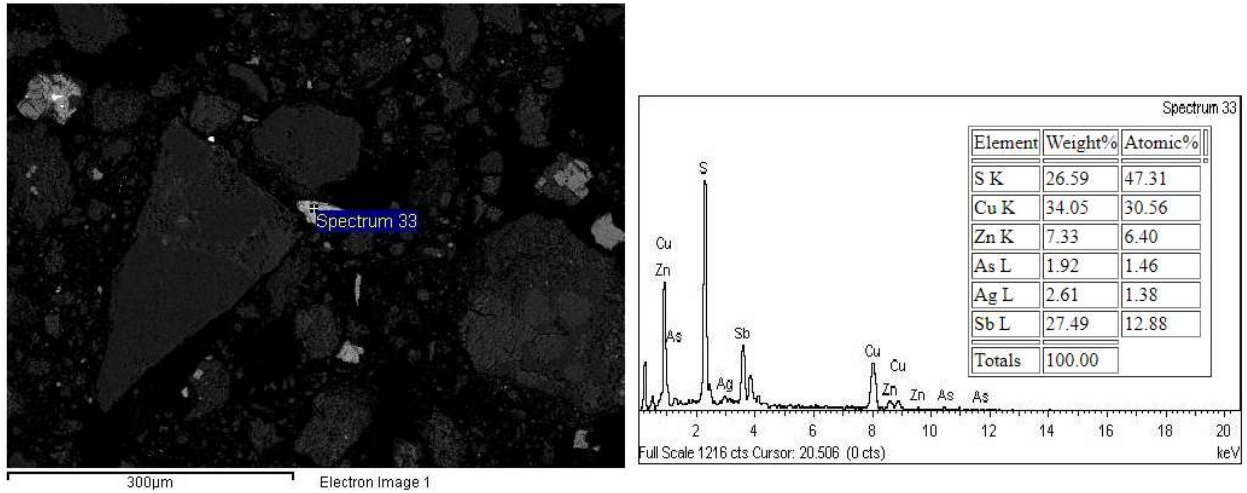


Figura 35. Fotomicrografía de una partícula de Sulfosal Argentotennantita identificada por el espectro 33.

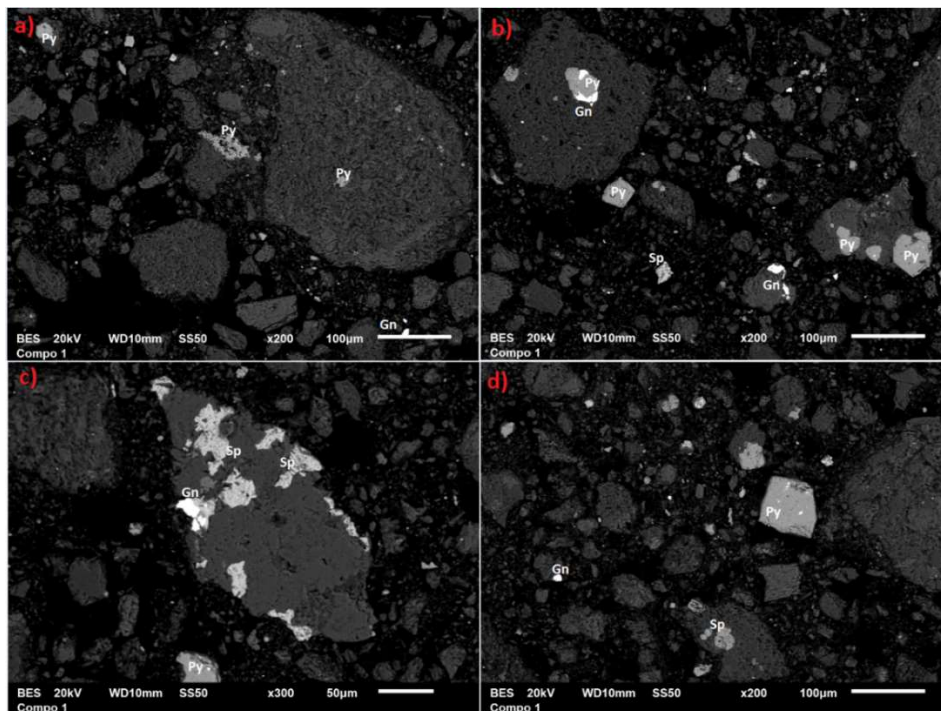
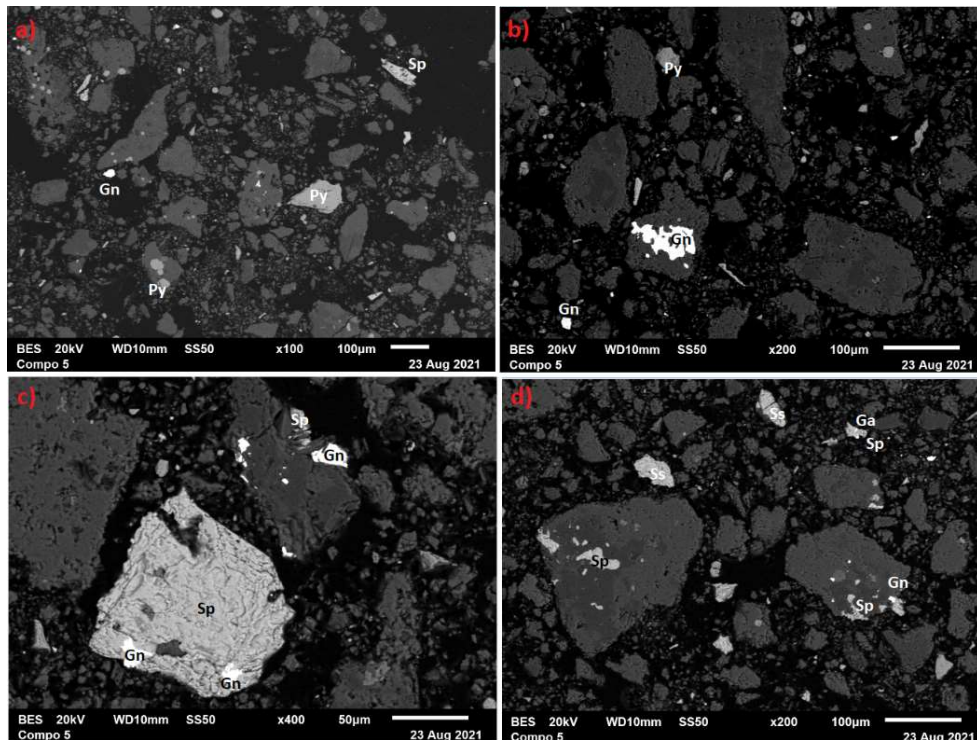


Figura 36. Fotomicrografías de la muestra ACO, donde se muestran las asociaciones entre minerales de valor y ganga.

Las especies de valor como la galena, se encuentra ocluida en partículas de pirita principalmente y a su vez asociado a la ganga en un tamaño de partícula que va de los 10 a 20  $\mu\text{m}$  de diámetro. Otra asociación se presenta entre la esfalerita, la galena y la ganga (Figura 36).

### Microscopía electrónica de barrido de superficies pulidas de muestra ACO

Las diferencias significativas en cuanto a la muestra ACO es que no se presenta galena ocluida en la pirita, si no que la pirita se encuentra asociada principalmente a la ganga. De igual forma la galena se presenta en tamaños de partícula que va desde 10 a 80  $\mu\text{m}$  de diámetro y se asocia principalmente a la ganga y a partículas de esfalerita de mayor tamaño. Por último, una asociación común en esta muestra es entre galena, esfalerita y ganga (Figura 37).



**Figura 37.** Fotomicrografías de la muestra BCO, donde se muestran las asociaciones de los minerales de valor y ganga.

Cabe señalar que, debido a las diversas asociaciones observadas entre la galena, esfalerita y ganga, se considera que en la etapa de flotación será complicado lograr una separación selectiva entre plomo y zinc, no obstante, como estrategia para evaluar el efecto global de las propiedades geológicas en la flotación, se decidió no añadir depresores de pirita ni de esfalerita ya que afectaría notablemente la recuperación del plomo en el concentrado.

## **4.2. DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES GEOLÓGICAS**

Las propiedades geológicas formadas a partir del génesis de la roca o posteriormente, debido a factores externos impactan directa o indirectamente los resultados finales del proceso metalúrgico.

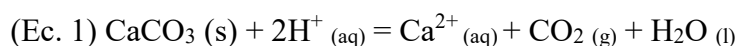
Las principales características geológicas que se deben de tener en cuenta en el proceso de beneficio es el tipo de roca, textura mineral, tipo de intercrecimiento y porcentaje de área expuesta, ya que afecta directamente en la etapa de molienda tanto en el consumo de energía, como en el grado de liberación alcanzado; así como en la interacción entre reactivos y minerales en el proceso de flotación. Otras características geológicas que afectan la eficiencia del proceso metalúrgico son el contenido de materia carbonosa, alteración mineral y estructuras sedimentológicas, incrementando el consumo de reactivos y reduciendo la recuperación de metales de interés.

En la presente investigación se definieron como características geológicas de interés, la materia carbonosa por sus efectos negativos en el rendimiento metalúrgico; y la alteración hidrotermal (alteración filica) por su relación con los procesos de decarbonación y decarbonatación de los yacimientos minerales. Los parámetros asociados a estas características geológicas, que

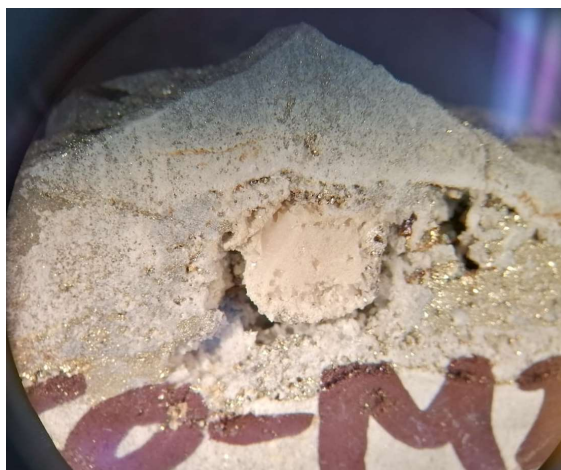
serán correlacionados con la respuesta metalúrgica, son los porcentajes de calcita, carbono orgánico y minerales de alteración.

#### 4.2.1. Determinación de carbonatos

Los carbonatos son minerales de cinética rápida y con solubilidad inversa, lo cual indica que a mayor temperatura son más difícilmente solubilizados, aunque es conocido que en un ambiente hidrotermal estos pueden ser removidos y precipitados en las cavidades generadas. Lo mencionado anteriormente se describe en la siguiente reacción química (Corbella, Cardellach y Ayora, 2007).



Una evidencia que se localizó en las muestras de mano BCO fue una drusa en donde se encontró un cristal subhedral de calcita, al cual se le aplicó ácido clorhídrico para distinguirlo de la roca que lo rodeaba, observándose que el cristal efervecía en una mayor proporción que las paredes de la cavidad (Figura 38). Lo anterior representa que la muestra BCO sufrió una decarbonatación significativa.



**Figura 38.** Cristal de calcita localizada en una drusa de la muestra BCO.

La sobreimpresión de carbonatos principalmente calcita y dolomita ( $\text{CaCO}_3$  y  $\text{MgCO}_3$ ) en el área de estudio, está relacionada con las diferentes alteraciones hidrotermales. Su origen sucede por el efecto retrogrado del sistema donde la presión y temperatura colapsan y se depositan cristales de estos minerales a manera de costrificaciones.

El contenido de carbonatos se determinó con un lavado de la muestra pulverizada, con una solución de ácido clorhídrico al 10 %, lo cual promueve una reacción similar a la descrita por la ecuación 1, pero con formación de cloruros de calcio.

Al generarse cloruros de calcio fue necesario hacer un par de lavados con agua destilada para eliminarlos y posteriormente las muestras se llevaron a secar en un horno a  $60^\circ\text{C}$  por un día, con el fin de obtener el contenido de  $\text{CaCO}_3$  en la muestra con base a la pérdida de peso. El contenido de calcita en cada compósito es el siguiente:

**Tabla 20. Porcentaje de calcita en cada uno de los compósitos establecidos.**

<b>Calcita</b>	
<b>Compósito</b>	<b>% <math>\text{CaCO}_3</math></b>
1	21.144
2	19.1525
3	16.91
4	13.93
5	12.185

#### 4.2.2. Alteración filica

La alteración filica se tipifica por la asociación cuarzo-sericita-pirita (CSP), es uno de los tipos más comunes de alteración y está presente en casi todos los yacimientos minerales. La sericita es referida como micas blancas dioctohedrales de grano fino, no teniendo diferencias marcadas con la composición de la muscovita, pudiéndose confundir con la pirofilita y la flogopita.

La sección del yacimiento de donde fue tomada la muestra BCO presentó principalmente una composición de clastos de feldespato potásico (ortoclasa), y al ser rocas sedimentarias con porosidad considerable se sugiere fue alterada de moderado a pervasivo y con esto formar secciones diferenciadas a la zona de donde se obtuvo la muestra ACO.

Para lograr una clasificación de la alteración filica presente en los compósitos, determinamos una escala de acuerdo al contenido de los minerales de alteración CSP presentes en la roca.

$$\% CSP = \sum \% Pirita + \% Sericita + \% Cuarzo$$

**Tabla 21.** Parámetro de alteración en la roca en relación al porcentaje de la relación CSP.

<b>% CSP</b>	<b>Descripción</b>
80-100	Pervasiva
60-80	Moderada-pervasiva
40-60	Moderada
20-40	Débil - moderada
0-20	Débil



La clasificación de cada compuesto en función de la alteración fílica de acuerdo a la petrografía fue la siguiente:

**Tabla 22.** Porcentaje de minerales respecto a la relación CSP observados mediante petrografía en cada uno de los compósitos.

<b>Compósito</b>	<b>Pirita %</b>	<b>Sericita %</b>	<b>Cuarzo %</b>	<b>% min alt</b>
<b>1</b>	5	10	15	30
<b>2</b>	8.75	12.5	17.5	38.75
<b>3</b>	12.5	15	20	47.5
<b>4</b>	16.25	17.5	22.5	56.25
<b>5</b>	20	20	25	65

#### 4.2.3. Contenido de Carbono orgánico total

El análisis de carbono orgánico se realizó en un determinador LECO; los resultados para la muestra ACO y BCO, fueron proporcionados por la empresa. El contenido de carbón para los compósitos intermedios fue calculado por medio de una ponderación entre el peso y ley de las muestras originales, y sus contribuciones al establecimiento de los compósitos (Tabla 23).

**Tabla 23.** Porcentaje de carbono orgánico contenido en cada uno de los compósitos.

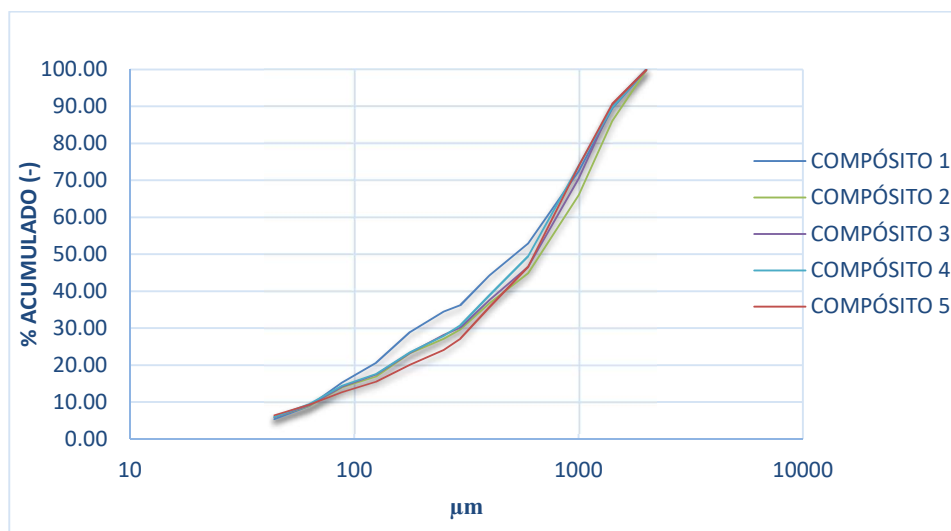
<b>carbono orgánico</b>	
<b>Compósito</b>	<b>% Carbono orgánico</b>
1	0.34
2	0.27
3	0.19
4	0.12
5	0.04



### 4.3. RESPUESTA METALÚRGICA

#### 4.3.1. Granulometría de cabeza

La granulometría de cabeza se realizó a cada uno de los compósitos. Como se observa en la gráfica (Figura 39), posee distribuciones de tamaño de partículas semejantes, por lo cual es posible realizar una comparación del comportamiento de cada uno de los compósitos en la cinética de molienda. En este gráfico es posible observar una mayor proporción en la generación de finos conforme la alteración filica disminuye en los compósitos, lo cual pudiera atribuirse al menor contenido de cuarzo en la muestra, alto contenido de calcita y presencia de laminación paralela.



**Figura 39.** Curvas granulométricas de los compósitos, después de la reducción de tamaño con la quebradora de cono.

#### 4.3.2. Cálculo de tiempo de molienda

Los resultados de la cinética de molienda nos indican que la distribución granulométrica va migrando hacia la derecha, es decir, el mineral se opone a ser reducido de tamaño de diferente

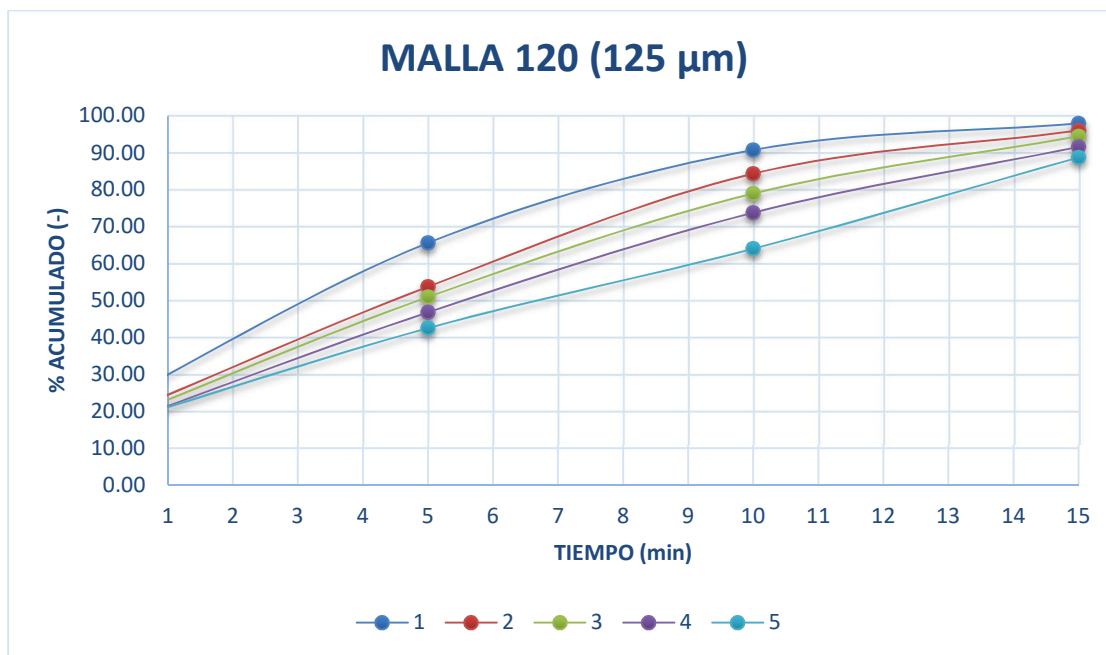
manera, y es conformado en los diferentes tiempos analizados por partículas más gruesas en tanto el compuesto va cambiando desde la muestra ACO (Compósito 1) a BCO (Compósito 5), indicándonos un aumento en la dureza.

Este postulado anterior se puede determinar al analizar el porcentaje de mineral que pasa por la malla 120 (125  $\mu\text{m}$ ), que es el P80 en planta (Tabla 24).

**Tabla 24.** Porcentaje de partículas que pasan a través de la malla 120 (125  $\mu\text{m}$ ) a los tiempos 0, 5, 10 y 15 minutos de molienda de cada uno de los compósitos.

COMPOSITO	% Muestra –malla 120			
	0 min	5 min	10 min	15 min
1	20.6	65.6	90.7	97.9
2	16.9	53.6	84.3	96.0
3	16	50.9	78.9	94.4
4	15	46.8	73.7	91.6
5	15.6	42.5	64.0	88.7

La grafica indica el tiempo necesario para lograr un P80 de 125  $\mu\text{m}$  aproximadamente, y confirma que la dureza aumenta conforme el contenido de muestra con mayor alteración filica (BCO) es mayor en los compósitos. Para determinar el tiempo con mayor precisión se utilizó regresión polinomial que permita un mejor ajuste a la función de los datos. Las funciones generadas por medio del ajuste se presentan en la tabla 25.



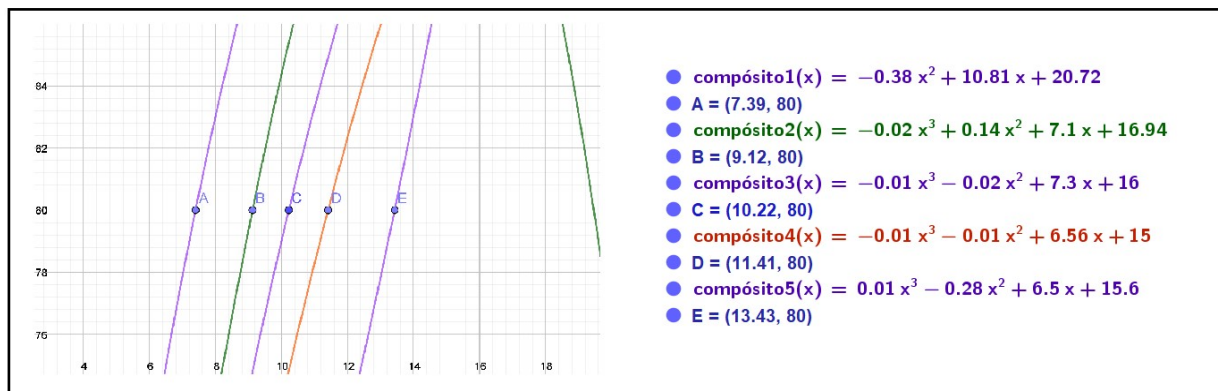
**Figura 40.** Gráfica del comportamiento del acumulado negativo de la malla 120, respecto al y tiempo de molienda en cada uno de los compósitos minerales.

**Tabla 25.** Funciones polinomiales del comportamiento del p80 en función del lapso de tiempo de 0-15 minutos.

Compósito	Función polinomial	Orden	R <sup>2</sup>
1	$f(x) = -0.3782x^2 + 10.814x + 20.72$	2	1
2	$f(x) = -0.0172x^3 + 0.1367x^2 + 7.0966x + 16.943$	3	1
3	$f(x) = -0.0075x^3 - 0.0248x^2 + 7.2983x + 16$	3	1
4	$f(x) = -0.0057x^3 - 0.0106x^2 + 6.5587x + 15$	3	1
5	$f(x) = 0.0114x^3 - 0.2798x^2 + 6.497x + 15.6$	3	1

Las funciones polinomiales fueron graficadas en el software GeoGebra classic 5, para determinar el tiempo necesario para la molienda de cada uno de los compósitos a un P80 de 125μm, (Figura 41). Como se puede observar la mayoría de los grupos de datos se ajustan a un polinomio de tercer grado con excepción del compósito 1, es por eso, se decidió utilizar la sección correspondiente de 0 a 15 minutos. A partir de las expresiones polinomiales se determinó el tiempo de residencia en el molino mediante la intersección de la función con el 80 % (identificado con los

puntos A, B, C, D, E) los cuales son presentados en la tabla 26 y fueron los utilizados para la preparación de cada compuesto mineral previo a las pruebas de flotación.



**Figura 41.** Gráfica donde muestra el tiempo exacto de molienda de cada uno de los compósitos para obtener P80 de 125 µm.

**Tabla 26.** Tiempo necesario de molienda para obtener un P80 de 125 µm de cada uno de los compósitos.

Compósito	Tiempo de molienda (min)
1	7.39
2	9.12
3	10.22
4	11.41
5	13.43

### 4.3.3. Evaluación de la recuperación en flotación Pb-Zn

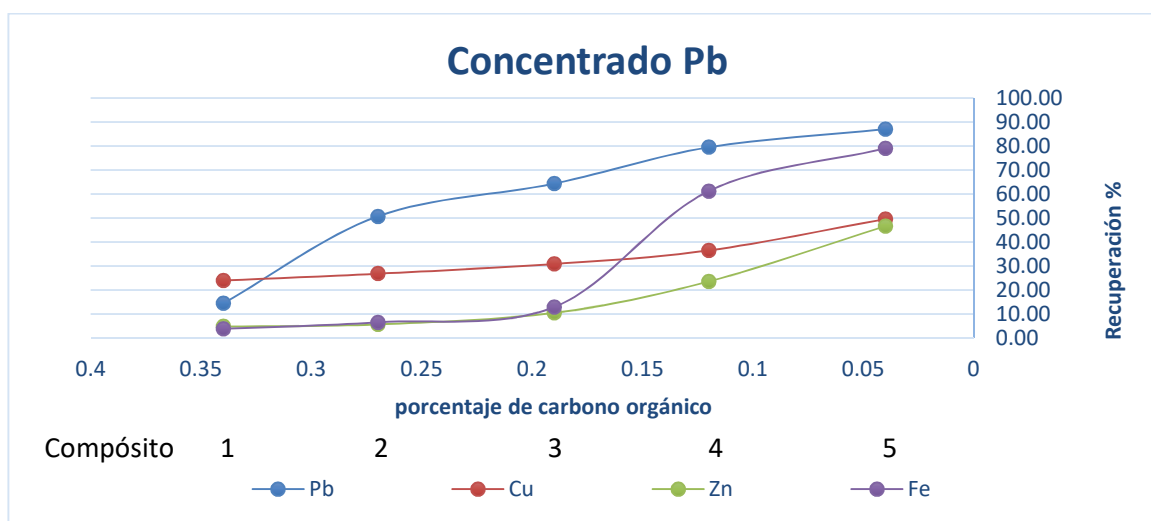
#### Flotación plomo-zinc sin remoción de materia carbonosa (SR)

Las recuperaciones obtenidas en cada etapa de la flotación plomo-zinc sin remoción de materia carbonosa, se calcularon mediante un balance metalúrgico y se muestra la distribución de los elementos de valor en el concentrado de plomo y zinc, así como los valores que no flotaron y se quedaron en las colas.

**Tabla 27.** Recuperaciones de especies de valor en cada uno de los concentrados obtenidos en la flotación SR de carbón.

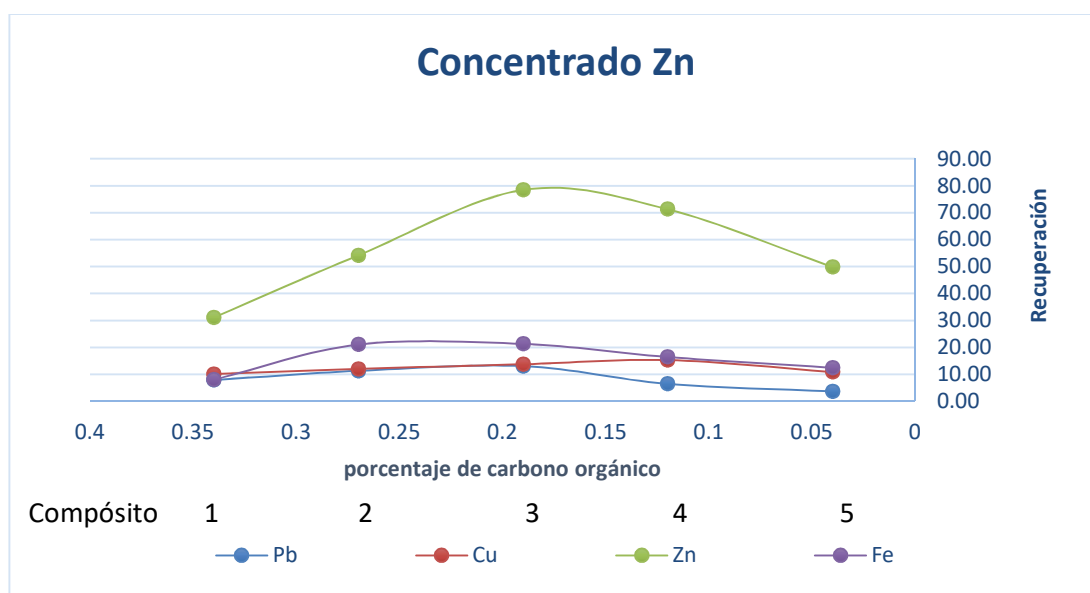
Comp	% Contenido											
	Concentrado Pb				Concentrado Zn				Colas			
	Pb	Cu	Zn	Fe	Pb	Cu	Zn	Fe	Pb	Cu	Zn	Fe
1	14.49	24.05	4.91	3.85	7.93	10.15	31.15	8.14	77.57	65.80	63.94	88.01
2	50.74	26.91	5.82	6.61	11.35	12.08	54.23	21.15	37.91	61.01	39.95	72.24
3	64.43	30.93	10.62	12.94	13.10	13.82	78.58	21.42	22.47	55.24	10.80	65.64
4	79.57	36.59	23.69	61.25	6.54	15.35	71.37	16.56	13.89	48.06	4.94	22.19
5	87.09	49.57	46.69	79.03	3.73	10.97	49.94	12.53	9.18	39.46	3.37	8.44

El concentrado de plomo en el compuesto 1, muestra baja recuperación de sulfuros de valor cuando el contenido de carbono orgánico es alto. Conforme el contenido orgánico va disminuyendo se observa un alza en la recuperación del plomo y cobre; el zinc se mantiene en valores de baja recuperación hasta el compuesto 3, mientras que para los compósitos 4 y 5 se incrementa la recuperación de zinc y hierro, lo cual sugiere que el efecto del carbón disminuye progresivamente, pudiéndose alcanzar condiciones que favorecen incluso la flotación de los sulfuros asociados al mineral de plomo (Figura 42).



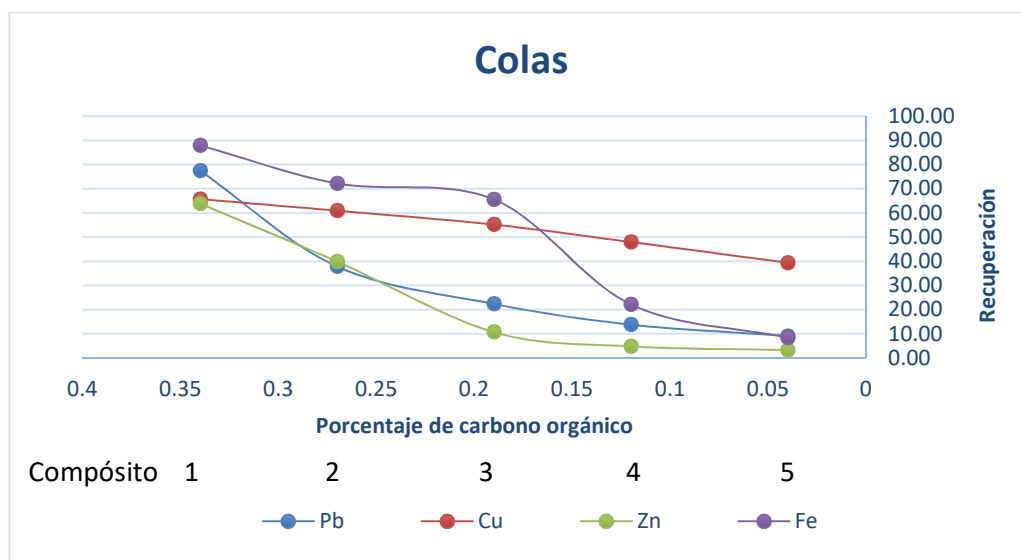
**Figura 42.** Recuperación de especies de valor en concentrado de plomo en circuito de flotación SR, respecto a contenido de carbono orgánico.

La recuperación de sulfuros de plomo, cobre y hierro en la etapa de flotación de zinc es baja para todos los compósitos (Figura 43). Para el caso del zinc, presenta un máximo para el compósito 3 disminuyendo conforme el contenido de carbono orgánico incrementa (Compósito 1 y 2). La disminución en la recuperación de zinc para los compósitos 4 y 5 es resultado del bajo contenido de zinc remanente en la muestra, ya que este sulfuro que floto previamente en el concentrado de plomo, debido a que no se añadieron depresores de zinc.



**Figura 43.** Recuperación de especies de valor en concentrado de zinc en flotación SR respecto a contenido de carbono orgánico.

El contenido de metales en las colas, disminuye conforme es menor el contenido de carbono orgánico. Para los compósitos del 1 al 3, gran parte de los sulfuros no flotaron por el efecto que produce la materia carbonosa contenida, la cual adsorbe los reactivos utilizados, no permitiendo que los colectores se adhieran en las partículas de valor evitando alcanzar el grado de hidrofobicidad necesaria para flotarlos; así como disminuyendo la cantidad de espumante disponible para generar estabilidad de la espuma en la zona de colección (Figura 44).



**Figura 44.** Recuperación de especies de valor en colas en una flotación sin remoción respecto a contenido de carbono orgánico.

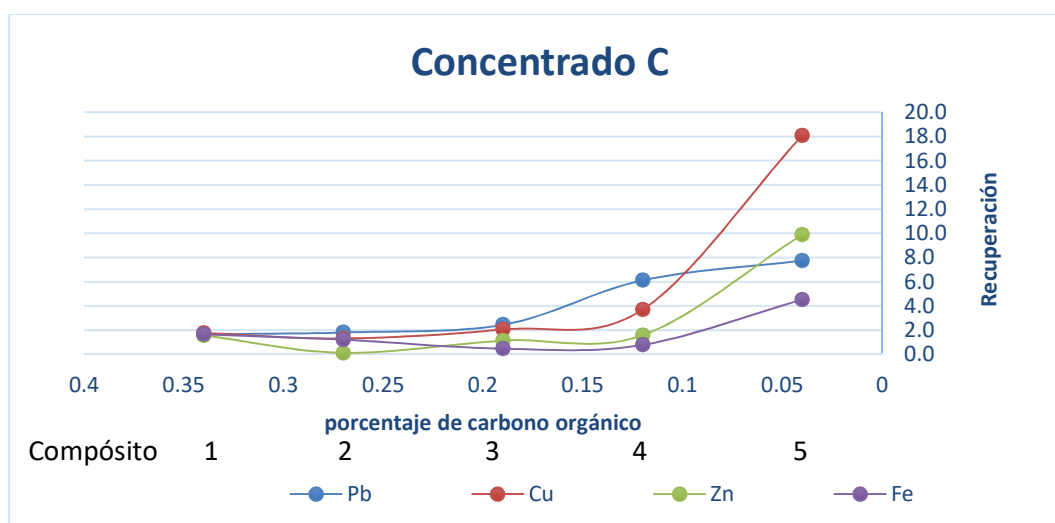
### Flotación plomo-zinc con remoción fisicoquímica de materia carbonosa (RFQ)

Para este caso, además de las recuperaciones de metales de interés en los concentrados de plomo, zinc y las colas, se determinó adicionalmente los metales de valor que se remueven en el concentrado de la materia carbonosa (Tabla 28).

**Tabla 28.** Recuperaciones de especies de valor en cada uno de los concentrados obtenidos en la flotación con RFQ de carbón.

Comp	% Distribución															
	Concentrado C				Concentrado Pb				Concentrado Zn				Colas			
	Pb	Cu	Zn	Fe	Pb	Cu	Zn	Fe	Pb	Cu	Zn	Fe	Pb	Cu	Zn	Fe
1	1.7	1.8	1.6	1.7	12.1	26.3	4.1	5.3	11.8	12.0	45.5	6.8	74.4	60.0	48.8	86.3
2	1.8	1.3	0.1	1.2	56.7	24.2	9.1	13.9	14.3	13.3	69.5	39.0	27.3	61.2	21.3	45.9
3	2.5	2.1	1.1	0.5	75.5	32.1	17.0	54.4	5.6	9.9	67.2	9.7	16.5	56.0	14.7	35.4
4	6.1	3.7	1.6	0.8	74.2	34.6	24.7	77.8	4.4	10.5	66.9	6.5	15.3	51.2	6.8	14.8
5	7.8	18.1	9.9	4.5	74.3	28.2	33.6	57.0	5.5	13.8	53.2	21.3	12.4	40.0	3.3	17.2

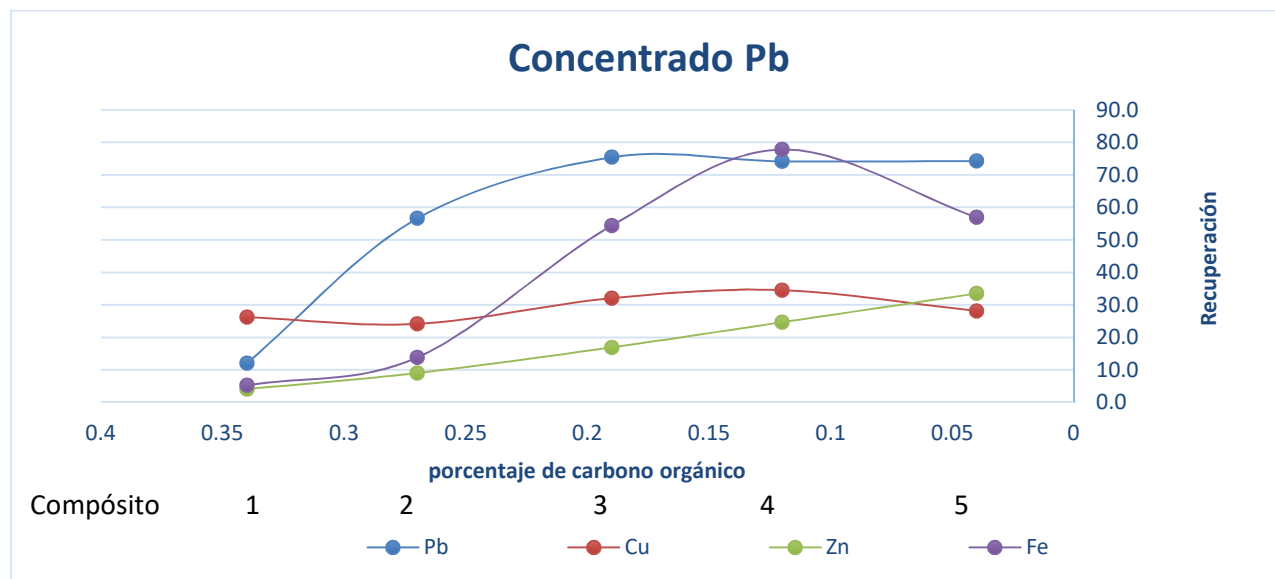
En el concentrado de carbón del compuesto 1 al 3, hay bajas recuperaciones de metales de interés las cuales comienzan a ascender a partir del compuesto 4. Conforme disminuye el contenido de carbono orgánico en los compuesto, el espumante comenzó a actuar de manera más eficiente e incluso la dosificación añadida puede verse sobrada, lo cual ocurre un arrastre mecánico de partículas de valor de tamaño fino o asociadas con el carbón, alcanzando recuperaciones del 18 % de cobre, 10 % de zinc y 8 % de plomo para el compuesto 5 (Figura 45).



**Figura 45.** Recuperación de especies de valor en concentrado de carbón de flotación con RFQ.

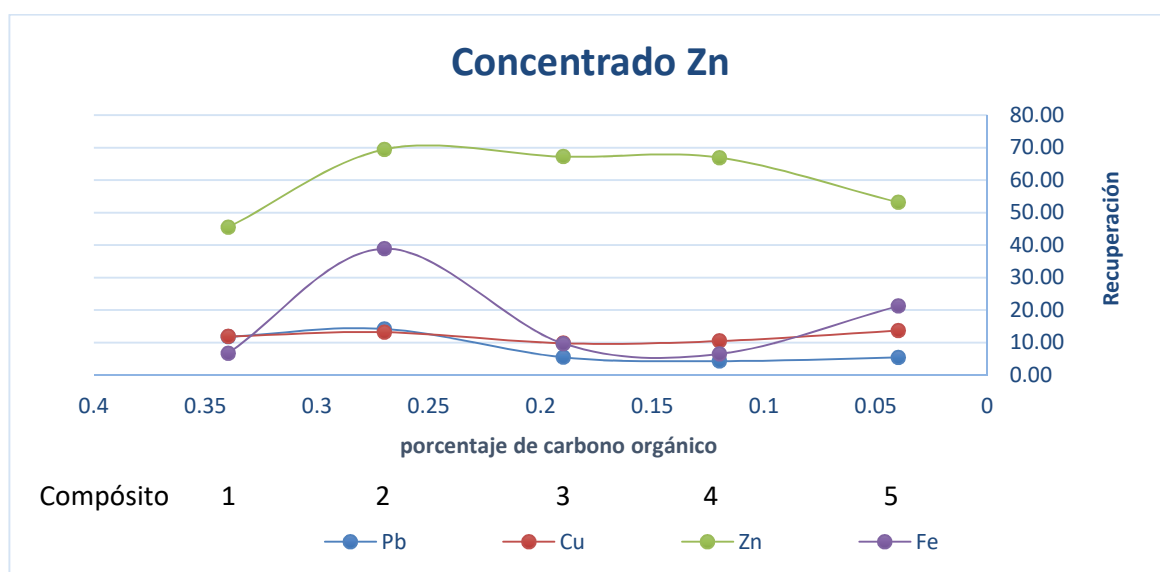
Para el caso de el compuesto 1 en la etapa de flotación de plomo se obtiene una muy baja recuperación de este metal, lo cual indica que la remoción de la materia carbonosa en la pre-flotación no fue efectiva o suficiente para permitir la recuperación de los minerales de valor. En el caso de los compósitos 3, 4 y 5, observamos valores de recuperación de plomo de alrededor del 75 %, lo cual nos indica una reducción en el contenido de materia carbonosa por efecto de la remoción previa. Para el caso del zinc su recuperación en el concentrado de plomo mostro un ligero incremento conforme el contenido de materia carbonosa disminuyó (Figura 46).





**Figura 46.** Recuperación de especies de valor en concentrado de plomo en la flotación con RFQ de carbón.

En la etapa de flotación de zinc la recuperación de los sulfuros fue baja para todos los compósitos, con excepción del sulfuro de zinc, la cual presenta recuperaciones de alrededor del 60 % para todos los compósitos (Figura 47).



**Figura 47.** Recuperación de especies de valor en concentrado de zinc en la flotación con RFQ de carbón.

Como era de esperarse, en las colas del compuesto 1 el contenido de sulfuros es alto, lo cual como anteriormente se indicó, es resultado de una remoción insuficiente de materia carbonosa en la etapa de pre-flotación. Cabe señalar que mientras el contenido de materia carbonosa en el compuesto disminuye, la eficiencia del proceso de pre-flotación se mejora generando menores pérdidas de valores en las colas del proceso de flotación (Figura 48).

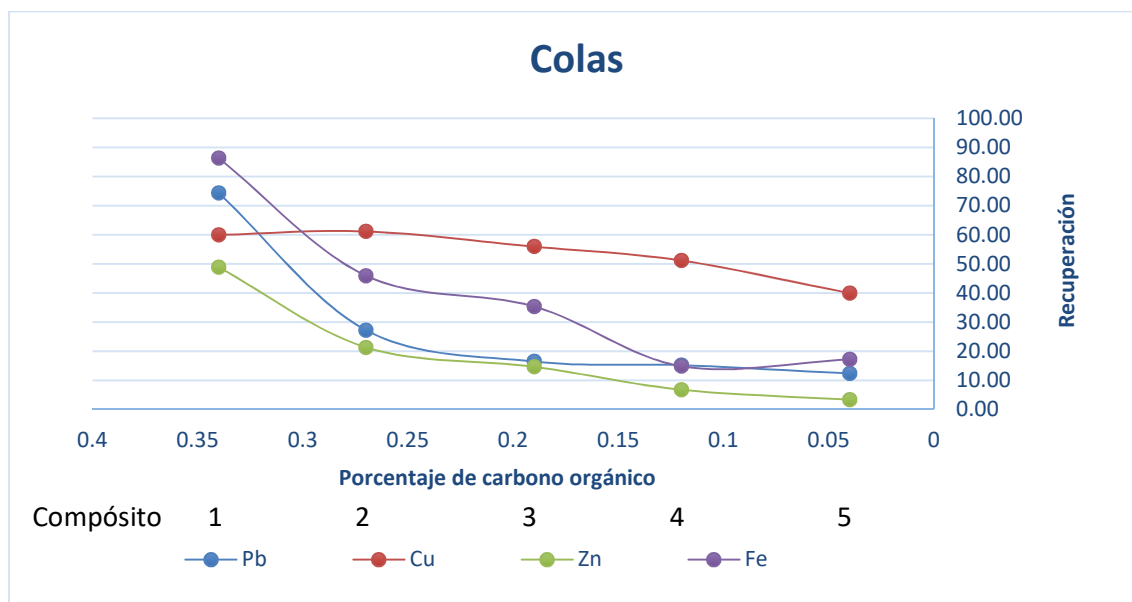


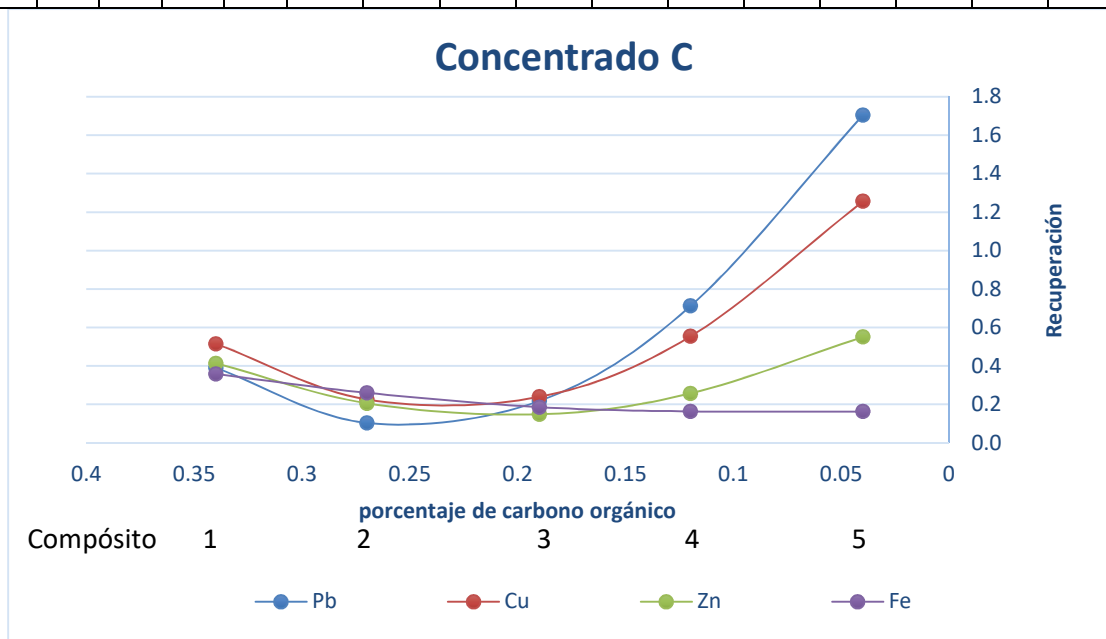
Figura 48. Recuperación de especies de valor en colas de la flotación con RFQ de carbón.

### Flotación plomo-zinc con remoción física de materia carbonosa (RF)

De manera similar al análisis con RFQ, en este caso las distribuciones de las especies de valor se disponen en tres concentrados y las colas. Los resultados para las pruebas de flotaciones con RF se muestran en la tabla 29. A partir de estos datos observamos que la pérdida de metales de valor en el concentrado de carbón es mínima, siendo esta alrededor del 1 % para todos los compósitos. Esto nos indica una buena selectividad del método RF para la materia carbonosa evitando el arrastre de metales de valores que se presentó en la RFQ (Figura 49).

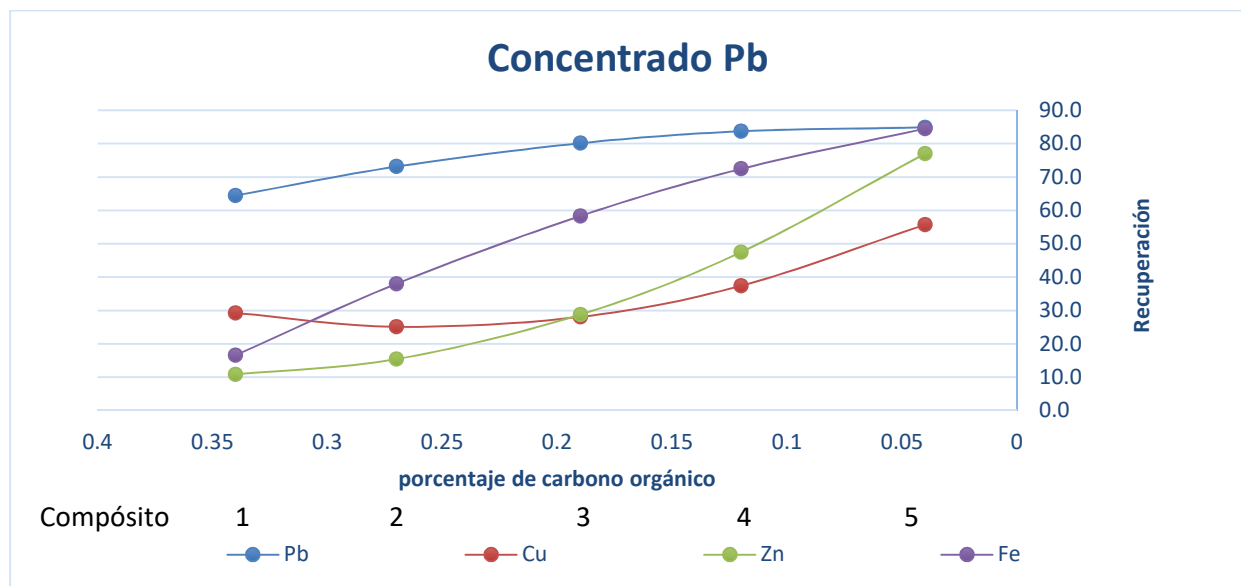
**Tabla 29.** Recuperaciones de especies de valor en cada uno de los concentrados obtenidos en la flotación con RF de carbón.

Comp	Concentrado C				Concentrado Pb				Concentrado Zn				Colas			
	Pb	Cu	Zn	Fe	Pb	Cu	Zn	Fe	Pb	Cu	Zn	Fe	Pb	Cu	Zn	Fe
1	0.4	0.5	0.4	0.4	64.5	29.3	10.8	16.7	19.7	18.1	83.7	41.1	15.4	52.0	5.1	41.9
2	0.1	0.2	0.2	0.3	73.2	25.2	15.4	38.1	13.3	16.6	79.3	27.7	13.5	57.9	5.1	34.0
3	0.2	0.2	0.1	0.2	80.2	28.2	28.8	58.4	8.0	15.1	66.5	16.3	11.6	56.5	4.6	25.1
4	0.7	0.6	0.3	0.2	83.8	37.5	47.5	72.5	5.2	13.9	48.4	9.8	10.3	48.1	3.8	17.5
5	1.7	1.3	0.6	0.2	84.9	55.8	77.0	84.5	4.1	12.7	20.0	6.2	9.2	30.2	2.5	9.0



**Figura 49.** Recuperación de especies de valor en concentrado de carbón de una flotación con RF.

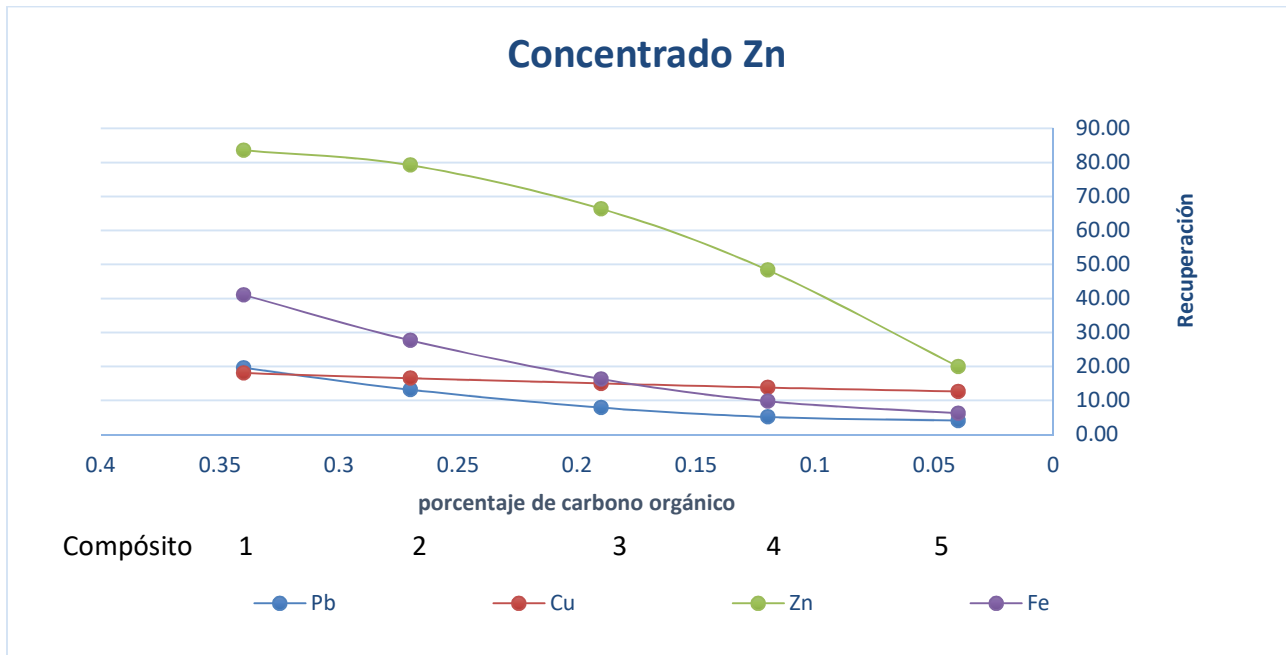
La flotación realizada al compósito 1 posterior a RF refleja una buena recuperación y un comportamiento selectivo para el plomo, lo que nos indica una remoción efectiva de la materia carbonosa. Conforme va disminuyendo el contenido de carbono orgánico en los compósitos, va aumentando la recuperación de los minerales de valor, especialmente el zinc, la cual alcanza hasta el 75% en el concentrado de plomo perdiendo la selectividad para éste. Lo anterior es debido a que no se usaron depresores de zinc y hierro; y al fuerte poder de colección del xantato isopropílico de sodio utilizado (Figura 50).



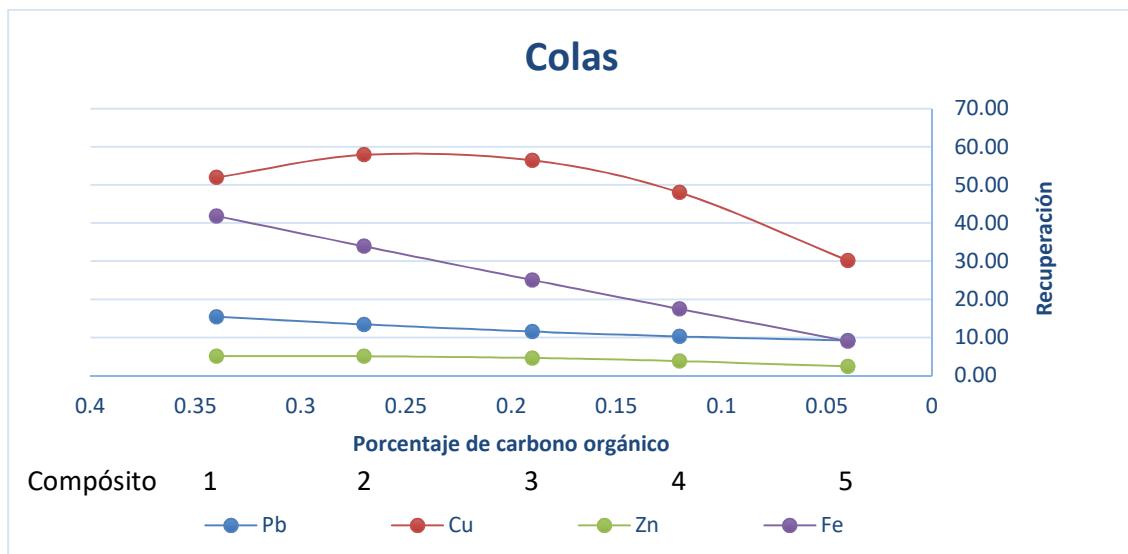
**Figura 50.** Recuperación de especies de valor en concentrado de plomo en una flotación con RF de carbón.

Respecto al concentrado de zinc, se presenta un decaimiento en la recuperación de las especies de valor, conforme el contenido de materia carbonosa inicial disminuye en el compósito. Además, la principal recuperación de estos valores se presentó en la etapa de flotación de plomo como resultado de la eficiente remoción de materia carbonosa por RF (Figura 51).

Los contenidos de plomo y zinc en las colas muestran un comportamiento similar entre sí (Distribución menor al 10 %). Estos resultados nos indican que la mayor parte de plomo y zinc se distribuyen en los concentrados respectivos, y que hay una recuperación global de más del 80%. En cuanto al hierro, en el compósito 1, buena parte del contenido llegó a colas y fue disminuyendo hasta el compósito 5, de manera lineal y progresiva (Figura 52).



**Figura 51.** Recuperación de especies de valor en concentrado de zinc en una flotación con RF de carbón.



**Figura 52.** Recuperación de especies de valor en colas en una flotación con RF de carbón.

## **Análisis comparativo entre las respuestas de flotación con los diferentes tratamientos previos (SR, RFQ y RF)**

La comparación de los resultados de los dos sistemas de remoción de materia carbonosa con la flotación sin remoción de ésta sugiere que la RF es el método más adecuado para el tratamiento de minerales con carbón, ya que presenta una recuperación de plomo que va de 64.51% de plomo en el compuesto 1 a 84.94% de plomo en el compuesto 5 (Figura 53).

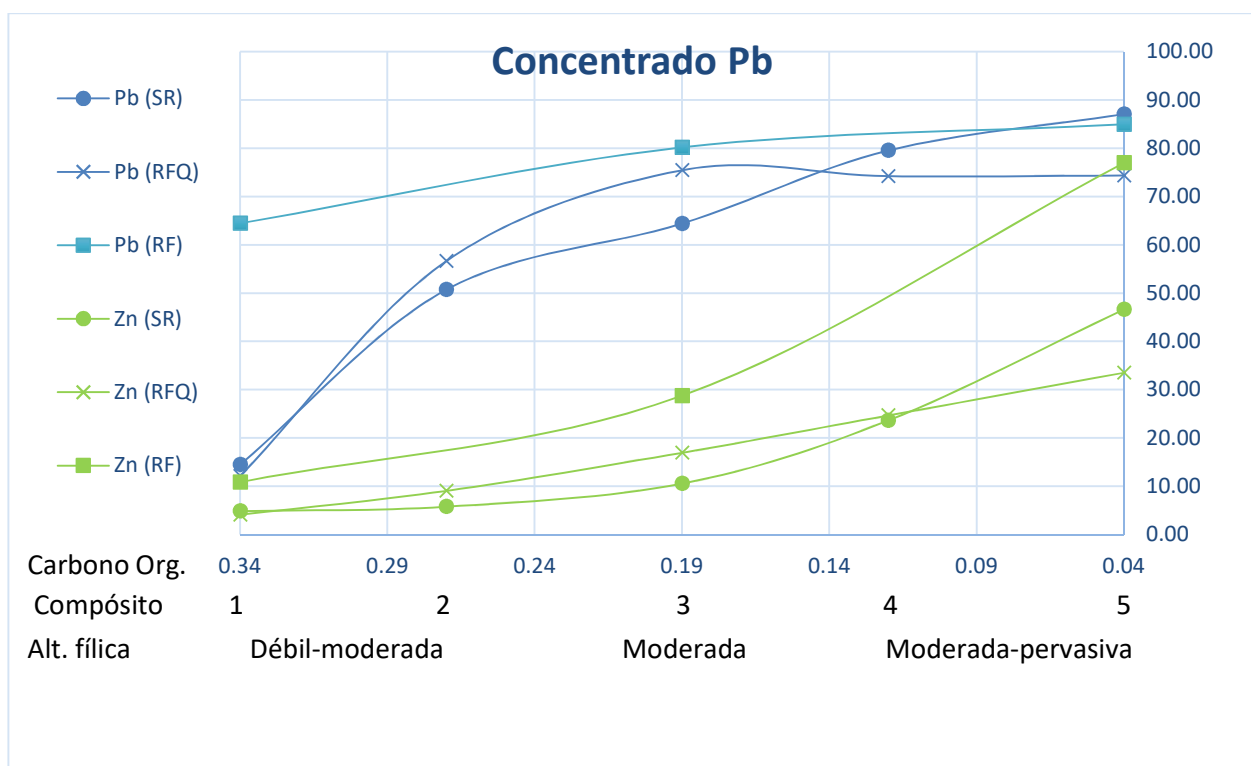
La comparación entre la flotación SR y la RFQ no muestra diferencia significativa entre las recuperaciones de plomo en la flotación del compuesto 1, el efecto del RFQ en las recuperaciones se hace notorio a partir del compuesto 2 y hasta al compuesto 4, identificándose un punto crítico en donde la pre-flotación perjudica notablemente la recuperación de metales de valor, debido a que arrastra valores en la espuma en el concentrado de carbón (Figura 53).

El contenido del zinc en el concentrado de plomo aumenta directamente, y se observa un comportamiento similar a la recuperación del plomo, este aumento es a causa de la asociación de los minerales de plomo y de zinc, como se observó en la microscopía electrónica de barrido y por el arrastre mecánico ocasionado por el aumento de la espuma que se genera por la disminución de la materia carbonosa en la muestra y la dosificación del espumante (Figura 53).

La comparación entre la flotación SR y con RF, muestra un cambio notorio incluso a partir del compuesto 1, ya que la recuperación de plomo aumenta considerablemente de 14.69% de plomo en la flotación SR a 64.51% en la flotación RF, indicando una mayor eficacia con respecto a la RFQ. En esta etapa no se muestra un punto crítico evidente, si no que siempre las recuperaciones son mayores a la flotación SR. Al comparar los métodos en el compuesto 5 no hay diferencias

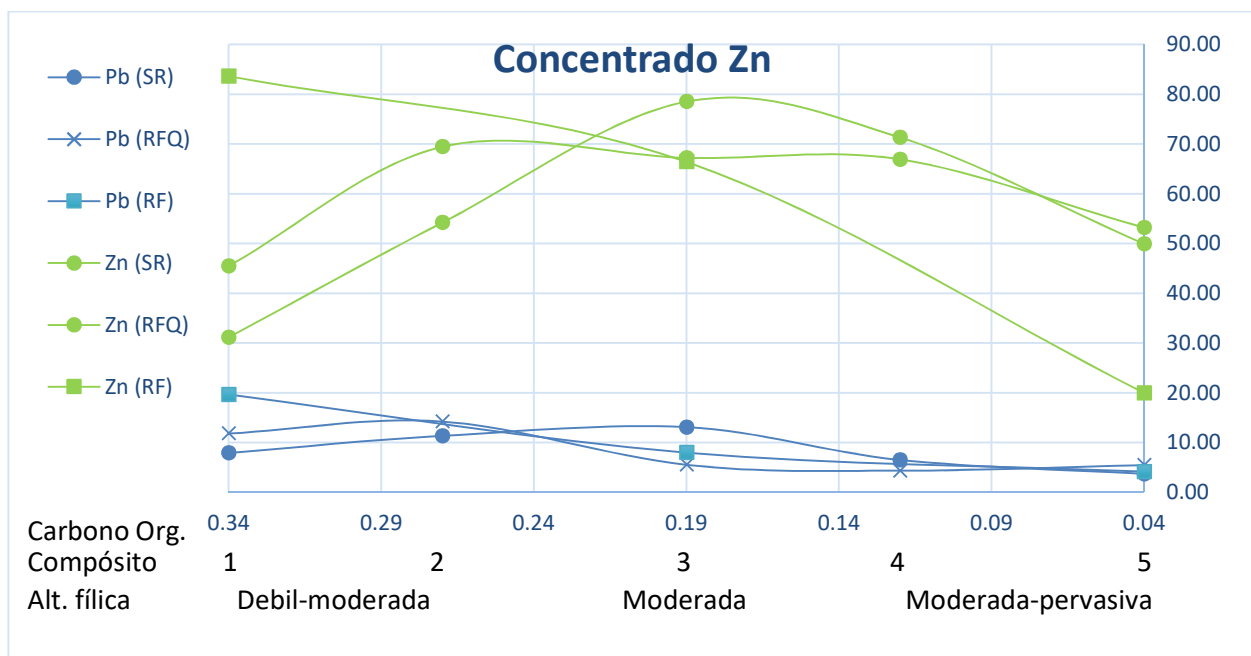
significativas en la recuperación indicando que en este punto el contenido de materia carbonosa es casi nulo y no afecta en la adición de reactivos, siendo las recuperaciones obtenidas resultado de las asociaciones entre minerales y a la dosificación de reactivos empleada.

La recuperación en el concentrado de zinc (Figura 54) con posterior RF se ve beneficiada en el compósito 1, alcanzado un valor mayor al 80%; progresivamente va disminuyendo debido al agotamiento de esta especie en la pulpa, como consecuencia de su flotación en el concentrado de plomo. Identificamos un punto crítico en el concentrado de zinc, alrededor de 0.23% de carbono orgánico, y que la flotación SR, tiene más selectividad.



**Figura 53.** Comparativa de las recuperaciones de plomo-zinc en concentrado de plomo de flotación SR, con RFQ y RF de carbón.

Las diferencias en las recuperaciones en el concentrado de zinc muestran que el mejor método para retirar el carbón en el compuesto 1 al 3 es la flotación RF, seguida con la flotación RFQ. Ya que muestra mejoría a comparación de la flotación SR. la recuperación baja del compuesto 3 al compuesto 5, debido a que en estos compósitos existe menos cantidad de carbón, y los colectores actúan en todas las especies minerales de sulfuros.



**Figura 54.** Comparativa de las recuperaciones de plomo-zinc en concentrado de zinc de flotación SR, con RFQ y RF de carbón.

De acuerdo a estos resultados se sugiere que la flotación con RFQ se debe desarrollar con dosificaciones mayores de reactivo espumante a las aquí empleadas (100 g/t) cuando la muestra contiene un porcentaje mayor a 0.30 % de carbono orgánico, y mantener los 100g/ton cuando el contenido de carbono orgánico sea mayor a 0.14%. Por debajo de ese porcentaje no se recomienda hacer este método, debido a que perjudica la recuperación de sulfuros de valor, arrastrándolos en la flotación de carbón.



## 4.4. MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE LAS RESPUESTAS METALÚRGICAS

### 4.4.1. Selección de variables independientes

Las variables independientes seleccionadas para realizar el análisis estadístico por su efecto en el resultado metalúrgico, son las propiedades geológicas presentadas a través de su cuantificación por los parámetros descritos en la sección 3.5, siendo estos el contenido de calcita, el grado de alteración y el contenido de materia carbonosa (Tabla 30).

**Tabla 30.** Parámetros correspondientes a las variables geológicas y su distribución en los compósitos.

Compósito	% CaCO <sub>3</sub>	(%) min. alteración	% Corg
1	21.14	25	0.34
2	19.15	37.5	0.27
3	16.91	50	0.19
4	13.93	62.5	0.12
5	12.18	75	0.04

### 4.4.2. Selección de variables dependientes

Las variables dependientes corresponden a los valores obtenidos en la respuesta metalúrgica de las pruebas realizadas. La primera variable dependiente seleccionada es el tiempo a los cuales se necesitó moler el mineral para lograr el P80 los cuales son:

**Tabla 31.** Tiempo de molienda necesario para cada uno de los compósitos minerales.

Compósito	Tiempo de molienda (min)
1	7.39
2	9.12
3	10.22
4	11.41
5	13.43

En lo que respecta al proceso de flotación, la variable dependiente seleccionada para el desarrollo de los modelos matemáticos empíricos es el porcentaje de recuperación de plomo en las pruebas de flotación sin o con diferentes tratamientos de remoción de carbón.

**Tabla 32.** Recuperaciones de los concentrados plomo y zinc en la flotación SR.

<b>Compósito</b>	<b>Recuperación Pb</b>
1	14.49
2	50.74
3	64.43
4	79.57
5	87.09

**Tabla 33.** Recuperaciones de los concentrados plomo en la flotación RFQ.

<b>Compósito</b>	<b>Recuperación Pb</b>
1	12.11
2	56.66
3	75.46
4	74.23
5	74.35

**Tabla 34.** Recuperaciones de los concentrados plomo y zinc en la flotación RF.

<b>Compósito</b>	<b>Recuperación Pb</b>
1	64.51
3	80.20
5	84.94

#### **4.4.3. Modelo matemático propuesto aplicado para molienda**

La variación en el tiempo de molienda analizado durante la cinética, nos indica un cambio en la dureza del mineral, por lo cual es necesario realizar un modelo matemático para predecir el tiempo necesario para lograr el P80 requerido en planta con base en las características geológicas. Para el mineral utilizado se realizaron dos modelos, el primero considera únicamente una variable

independiente que es la calcita contenida en las muestras, debido a que es un mineral de ganga que varía dependiendo de las condiciones de alteración de las muestras; el segundo, es un modelo multivariado en el cual nos apoyamos en la técnica de la petrografía para determinar los minerales presentes, la proporción y distribución en las muestras.

En el primer modelo fue analizada la covarianza entre la variable de contenido de calcita contra el tiempo calculado en la cinética de molienda, la cual tiene una relación inversa entre variables con un valor de -6.61, es decir, entre mayor sea el contenido de carbonato de calcio en la roca, menor será el tiempo de molienda. Estas variables tuvieron un coeficiente de correlación lineal de -0.985, lo cual se considera una alta correlación, permitiendo realizar un modelo matemático a partir de una regresión lineal con la fórmula de la pendiente-ordenada al origen  $y=mx+b$ , donde el valor de la pendiente es de 0.6136 y la ordenada al origen 20.539 formulando  $y=0.6136x+20.539$ , con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.9704.

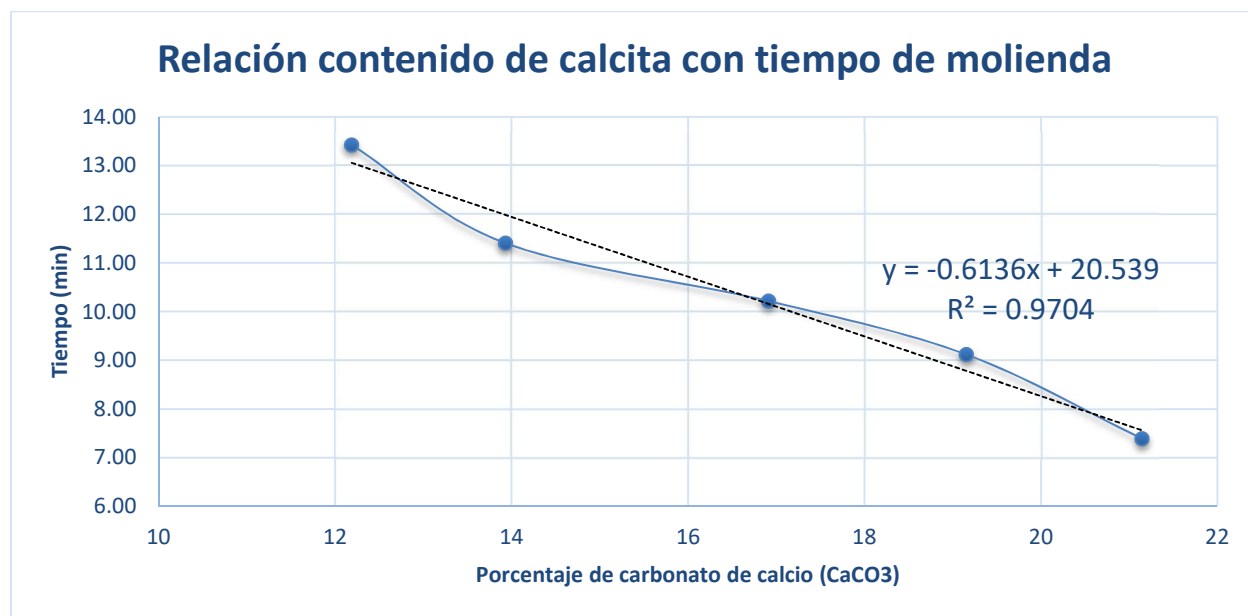


Figura 55. Relación de porcentaje de carbonato de calcio respecto al tiempo de molienda.

En el segundo modelo utilizamos las descripciones petrográficas para identificar los minerales de ganga y su proporción en las muestras, para integrarlo en un modelo multivariado en el cual determinemos el tiempo necesario para lograr un p80 de 125  $\mu\text{m}$ .

Para llevar a cabo el modelo multivariado separamos los minerales de ganga más abundantes en la muestra y los clasificamos en los grupos a los que corresponden. En el caso de los silicatos, definimos los porcentajes de los grupos presentes en las muestras, en particular los tectosilicatos (Cuarzo y ortoclasa) y los filosilicatos (sericita); así como los carbonatos en donde predomina la calcita. Los valores se normalizaron y se establecieron las variables independientes, las cuales son el contenido de carbonatos ( $x_1$ ) y la relación de los tectosilicatos/filosilicatos ( $x_2$ ). La variable dependiente será el tiempo necesario para lograr el p80 requerido. La ecuación del plano resultante para el modelo multivariado para molienda es  $y=20.7761-0.4581x_1-0.3789x_2$ . Los porcentajes de error de los modelos mencionados previamente se muestra en la tabla 35. Se puede observar que el modelo multivariado presenta un menor porcentaje de error que el modelo del contenido de calcita, lo cual estaría asociado que el primero integra más datos sobre la roca.

**Tabla 35.** Validación de modelos matemáticos aplicados para calcular el tiempo de molienda.

Compósito	Tiempo de molienda experimental (s)	Tiempo calculado regresión múltiple	Tiempo de molienda regresión lineal (CaCO <sub>3</sub> )	% error (Regresión)	% error (CaCO <sub>3</sub> )
1	7.390	7.446	7.565	0.753	2.351
2	9.120	8.871	8.787	2.728	3.753
3	10.220	10.271	10.163	0.497	0.555
4	11.410	11.947	11.992	4.704	4.868
5	13.430	13.036	13.062	2.937	2.821

Gracias a que existen diferencias sustanciales entre las propiedades geológicas de las muestras ACO y BCO, es posible atribuir las variaciones en el proceso de molienda a algunas de ellas. La muestra ACO presenta mayor contenido de carbonatos, como la calcita, lo cual la hace más suave, por lo que necesita menor tiempo de residencia en el molino para lograr el P80 necesario para la etapa de flotación, en contraste, con la muestra BCO que contiene una mayor cantidad de cuarzo, presentando una fractura concoide, elevando la dureza y por consiguiente necesita un mayor tiempo de residencia en el molino.

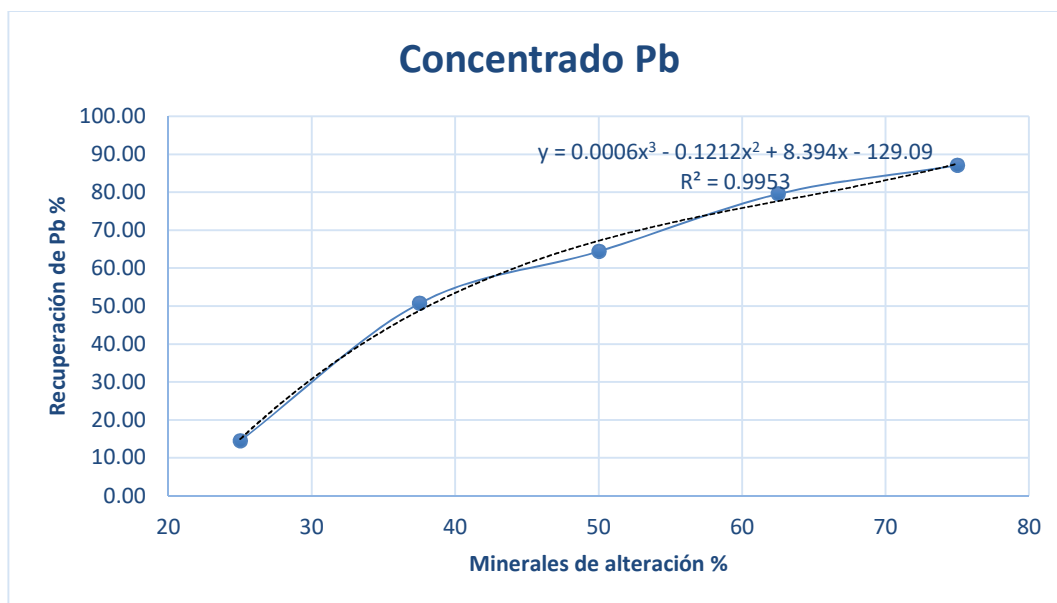
#### 4.4.4. Modelos matemáticos para predecir recuperación de plomo

##### Flotación plomo-zinc sin tratamiento previo

El análisis de covarianza indica una relación directa de la recuperación de plomo con el contenido de minerales de alteración e inversa respecto al contenido de carbono orgánico. Esta relación inversa entre los parámetros geológicos es de esperarse debido a que el contenido de carbón en un yacimiento es eliminado durante los procesos de alteración hidrotermal. No obstante, debido a que no se contó con una herramienta para la determinación de carbón orgánico, se decidió utilizar ambos parámetros geológicos para confirmar indirectamente el efecto del carbón orgánico en la respuesta metalúrgica.

El coeficiente de correlación entre el porcentaje de minerales de alteración y la recuperación del plomo es de 0.9593, indicando una correlación fuerte entre variables. Aunque exista una alta correlación, el ajuste lineal para determinar un modelo matemático no es el óptimo, debido al sesgo que pudieran tener los datos calculados con los reales, por lo cual se opta por utilizar la regresión polinomial de tercer grado, para establecer un modelo matemático con un coeficiente de determinación de 0.9953.

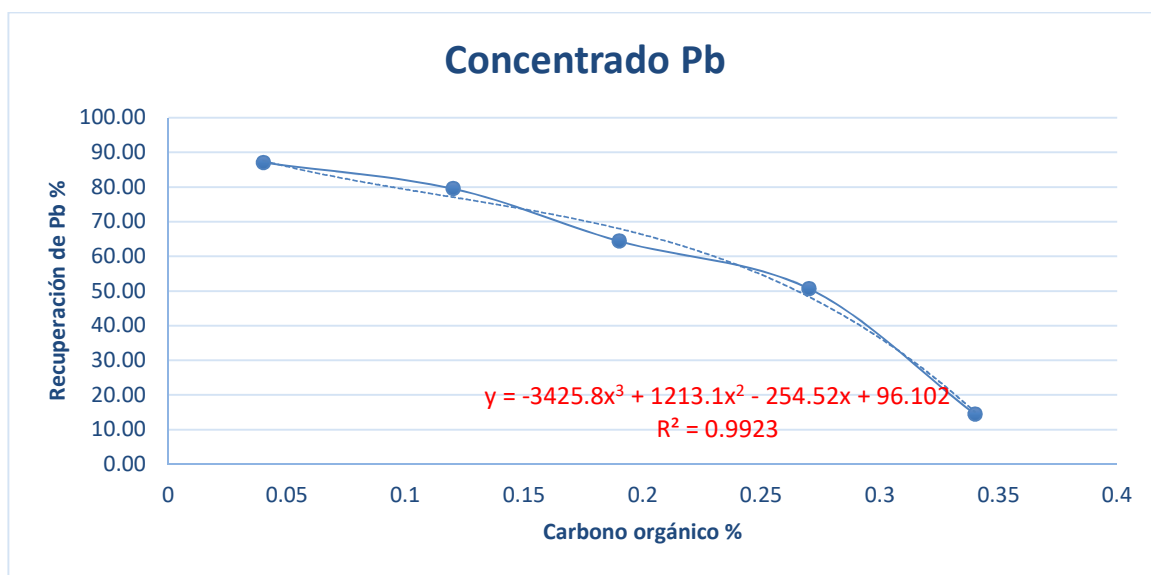
$$y = 0.0006x^3 - 0.1212x^2 + 8.394x - 129.09$$



**Figura 56.** Gráfica de recuperación de plomo en función del porcentaje de minerales de alteración en la flotación plomo-zinc ST.

La relación entre las variables de contenido orgánico y recuperación de plomo se comporta de manera inversa, teniendo una correlación de -0.9548. El ajuste utilizado es un modelo polinomial de tercer orden con el cual obtenemos un coeficiente de determinación de 0.9923 siendo el modelo matemático.

$$y = -3425x^3 + 1213.1x^2 - 254.52x + 96.102$$

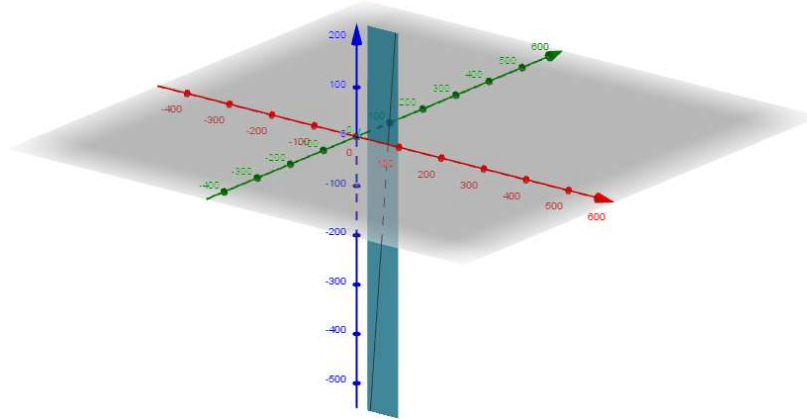


**Figura 57.** Gráfica de recuperación de plomo en función del contenido del porcentaje de carbono orgánico en la flotación plomo-zinc ST.

Debido a que en ambas gráficas el coeficiente de determinación es mayor a 0.90 lo que indica una tendencia lineal o fuertemente lineal, se desarrolló un análisis multivariado, en donde las variables independientes como el contenido de minerales de alteración ( $x_1$ ) y contenido de carbono orgánico ( $x_2$ ) son graficadas contra la recuperación metalúrgica ( $y$ ) en un modelo tridimensional. Para este análisis se utilizó el software Excel 2010 para facilitar los cálculos. El modelo matemático resultante representa la ecuación de un plano en un espacio tridimensional el cual es

$$y = -976.06 + 13.16x_1 + 1962.84x_2$$

El modelo tiene un coeficiente de correlación múltiple de 0.9795, lo cual determina una fuerte correlación entre estas tres variables, y un coeficiente de determinación de 0.9555. La representación gráfica de este modelo matemático fue elaborada en el software GeoGebra classic5.



**Figura 58.** Representación tridimensional del plano que representa el modelo matemático multivariado para la flotación plomo-zinc ST.

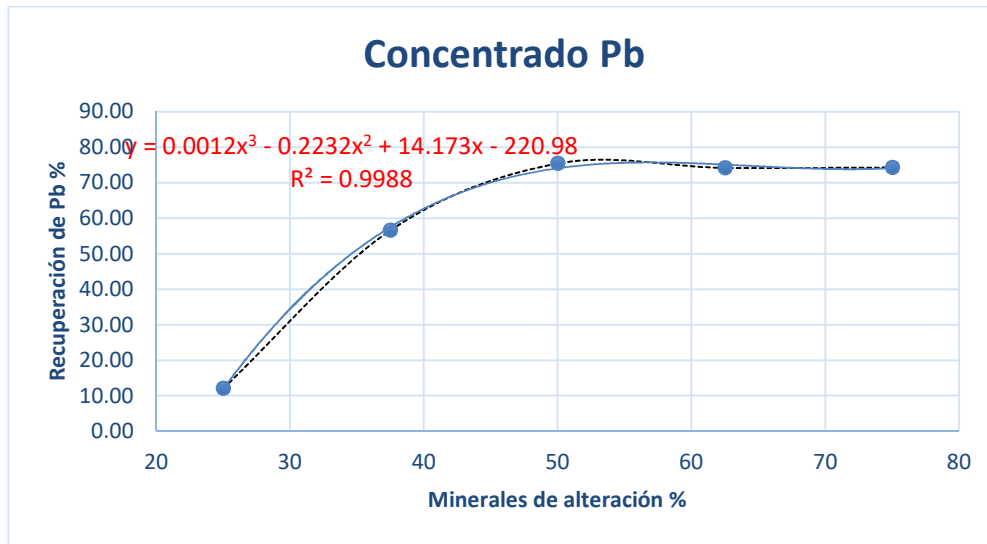
#### Flotación plomo-zinc con pre-flotación de remoción fisicoquímica de carbón

El análisis de covarianza indica una relación de la recuperación de plomo, directa respecto al contenido de minerales de alteración e inversa respecto al contenido de carbono orgánico.

El coeficiente de correlación entre el porcentaje de minerales de alteración y la recuperación del plomo es de 0.8281, indicando una correlación lineal entre variables no fuerte. La linealidad directa e inversa entre las variables se pierde por lo cual es necesario utilizar un modelo polinomial de tercer orden, para generar un modelo matemático que represente la respuesta metalúrgica en función de las características geológicas. El modelo matemático generado entre la alteración y la recuperación de plomo tiene un coeficiente de determinación de 0.9988, lo cual indica un ajuste casi perfecto de los datos, lo que da una representatividad adecuada.

$$y=0.0012x^3-0.2232x^2+14.173x-220.98$$

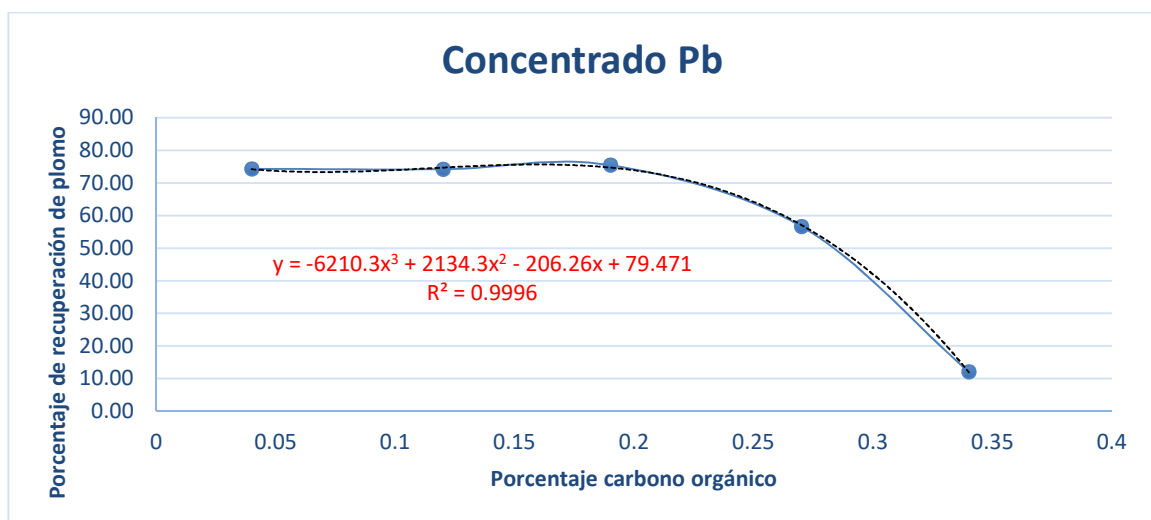




**Figura 59.** Gráfica de recuperación plomo en función del porcentaje de minerales de alteración en la flotación plomo-zinc con RFQ.

Respecto al contenido orgánico el coeficiente de correlación es de -0.8226 lo cual indica una correlación baja y la pérdida de linealidad entre los datos. Se utilizó un modelo polinomial de tercer orden para generar un modelo matemático representativo al comportamiento de la muestra con un coeficiente de determinación de 0.9996.

$$y = -6210.3x^3 + 2134.3x^2 - 206.26x + 79.471$$



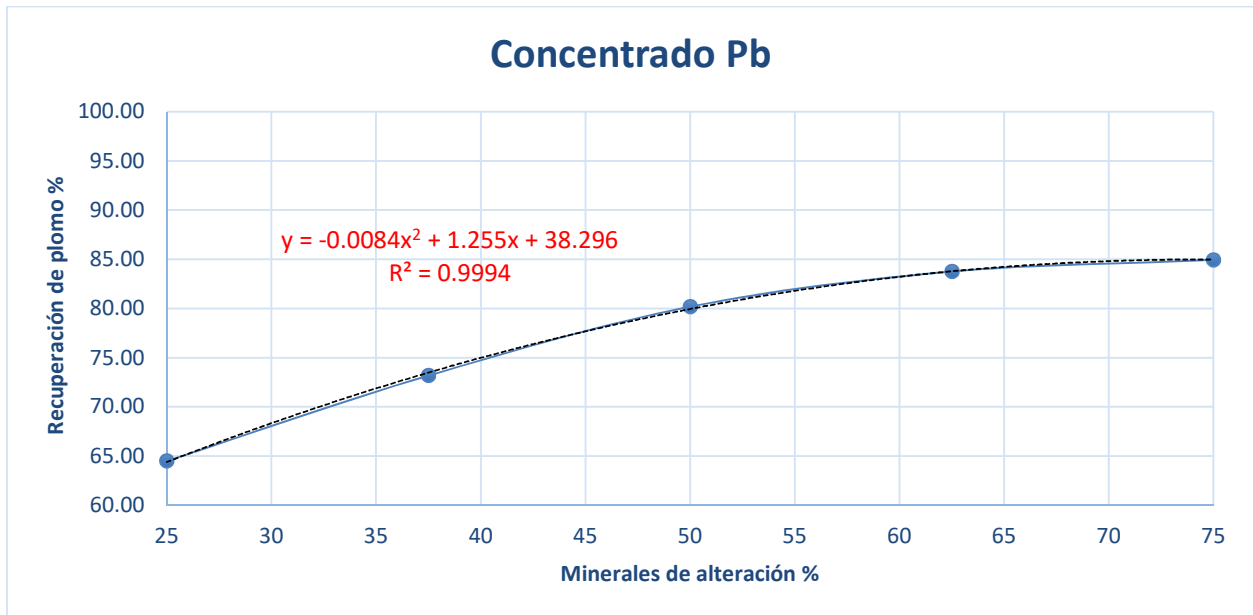
**Figura 60.** Gráfica de recuperación de plomo en función del contenido del porcentaje de carbono orgánico en la flotación plomo-zinc con RFQ.

Debido a que en esta flotación no hay una correlación lineal fuerte, no es posible realizar una correlación multivariada, ya que el modelo tendría errores significativos en la representación.

#### Flotación plomo-zinc con pre-flotación de remoción física de carbón

El análisis de covarianza indica una relación de la recuperación de plomo, directa respecto al contenido de minerales de alteración e inversa respecto al contenido de carbono orgánico. El coeficiente de correlación entre el porcentaje de minerales de alteración y la recuperación del plomo es de 0.9567, indicando una correlación fuerte entre variables. El mejor ajuste para formular el modelo matemático es una ecuación polinomial de segundo orden que representa los datos obtenidos experimentalmente, con un coeficiente de determinación de 0.9994.

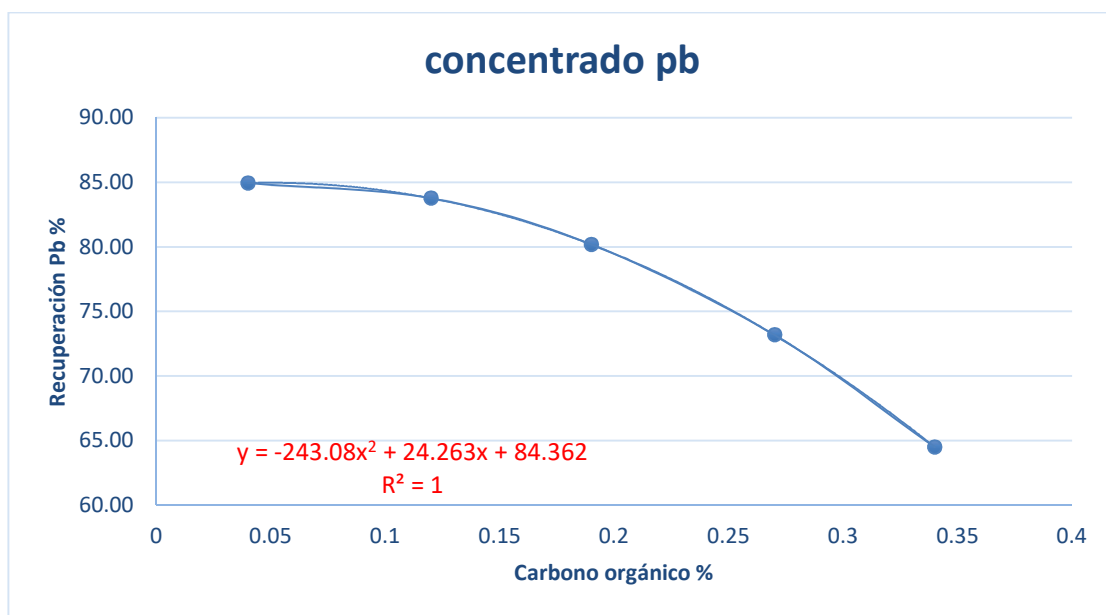
$$y = -0.0084x^2 + 1.255x + 38.296$$



**Figura 61.** Gráfica de recuperación plomo en función del porcentaje de minerales de alteración en la flotación plomo-zinc con RF.

En cuanto al análisis de correlación de recuperación de plomo respecto a contenido de carbón, el coeficiente es de -0.9536, representando una buena correlación de los datos de manera lineal. El ajuste para representar los datos matemáticamente es polinomial de segundo orden con un ajuste perfecto dado a que el coeficiente de determinación es igual a 1.

$$y = -243.08x^2 + 24.263x + 84.362$$



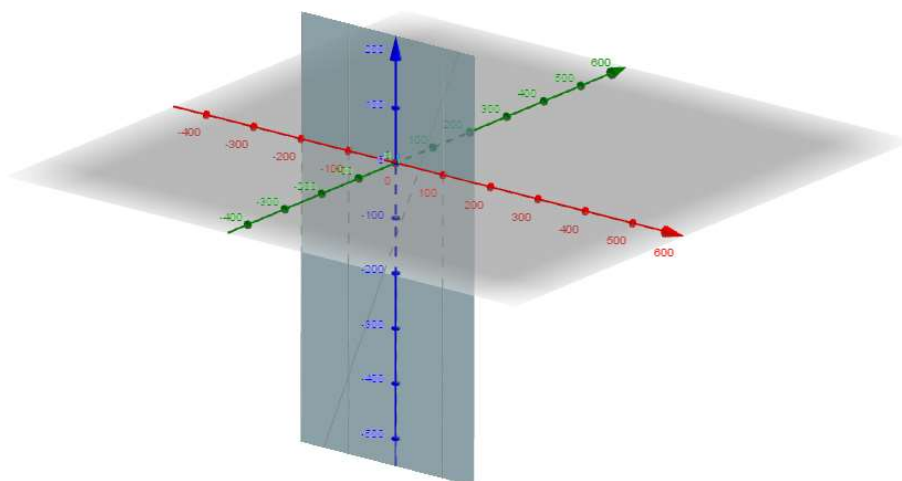
**Figura 62.** Gráfica de recuperación de plomo en función del contenido del porcentaje de carbono orgánico en la flotación plomo-zinc con RF.

Debido a que en ambas gráficas el coeficiente de determinación es mayor a 0.90 lo que indica una tendencia lineal o fuertemente lineal, el análisis multivariado se llevó a cabo en esta forma de remoción de carbón, teniendo como la ecuación del plano

$$y = -136.36 + 2.73x_1 + 386.40x_2$$

En donde las variables independientes de porcentaje de minerales de alteración son representadas por “ $x_1$ ” y el porcentaje de contenido de carbono orgánico “ $x_2$ ”, la recuperación de plomo como variable dependiente “ $y$ ”.

El modelo tiene un coeficiente de correlación múltiple de 0.9648, lo cual determina una fuerte correlación entre estas tres variables, y un coeficiente de determinación de 0.9308. La representación gráfica de este modelo matemático fue elaborada en el software GeoGebra classic5.



**Figura 63.** Representación tridimensional del plano que representa el modelo matemático multivariado para la flotación plomo-zinc con RF.

A partir de la caracterización mineralógica y la recuperación metalúrgica se determinaron variables dependientes e independientes para formular modelos matemáticos, los cuales nos puedan representar la respuesta metalúrgica del plomo en los distintos métodos utilizados en el presente trabajo, en un rango de 0.04% a 0.34% de materia carbonosa, lo cual se describen en la siguiente tabla.

**Tabla 36.** Modelos matemáticos elaborados para predecir la recuperación de plomo en un rango de contenido de materia carbonosa de 0.04% a 0.34% y modelos matemáticos a partir del contenido de minerales de alteración.

Tipo de flotación	Modelo matemático para predecir la recuperación a partir de la alteración (x)
SR	$y = 0.0006x^3 - 0.1212x^2 + 8.394x - 129.09$
RFQ	$y = 0.0012x^3 - 0.2232x^2 + 14.173x - 220.98$
RF	$y = 0.0012x^3 - 0.2232x^2 + 14.173x - 220.98$

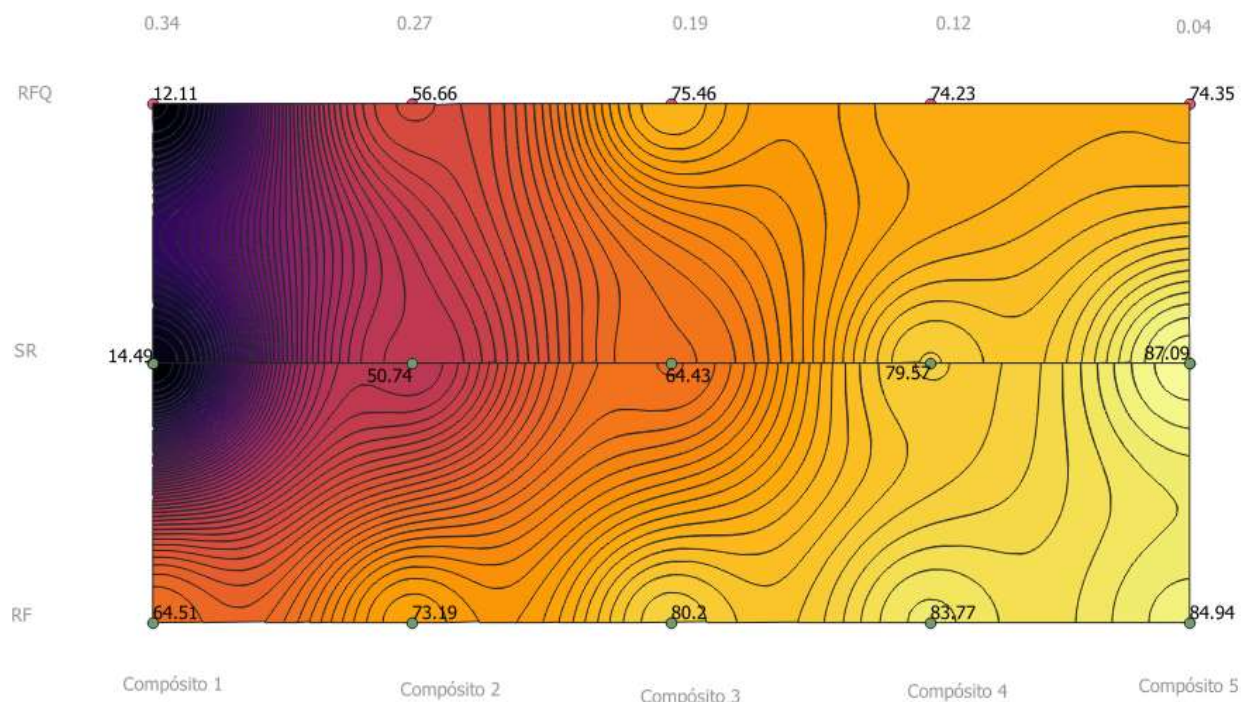
Tipo de flotación	Modelo matemático para predecir la recuperación a partir del contenido de carbono orgánico (x)
SR	$y = -3425x^3 + 1213.1x^2 - 254.52x + 96.102$
RFQ	$y = -6210.3x^3 + 2134.3x^2 - 206.26x + 79.471$
RF	$y = -243.08x^2 + 24.263x + 84.362$

Generamos dos modelos matemáticos de correlación lineal múltiple, para determinar la recuperación de plomo a partir del porcentaje de minerales de alteración y el porcentaje de materia carbonosa presente en la muestra, específicamente para la flotación SR y para la flotación RF, los cuales se representan en la siguiente tabla.

**Tabla 37.** Modelos matemáticos multivariados en donde  $x_1$  representa el porcentaje de minerales de alteración en la muestra y  $x_2$  el porcentaje de materia carbonosa.

Tipo de flotación	Modelo matemático multivariado para predecir la recuperación a partir del contenido de minerales de alteración ( $x_1$ ) de carbono orgánico ( $x_2$ )
SR	$y = -976.06 + 13.16x_1 + 1962.84x_2$
RF	$y = -136.36 + 2.73x_1 + 386.40x_2$

En el siguiente diagrama se muestran las recuperaciones de plomo de cada uno de los compósitos con las tres flotaciones utilizadas y se representa mediante el análisis de interpolación IDW el cambio en la variabilidad a través de curvas de isovalores que representan el comportamiento de cada uno de los compósitos. Los colores oscuros representan baja recuperación y los colores cálidos alta recuperación, en el cual se puede concluir que en la flotación con RF el compósito 1 obtiene recuperaciones iguales que el compósito 3 de la flotación SR lo cual indica que se redujo 0.15% de carbono orgánico, mientras que la flotación con RFQ no remueve considerablemente la materia carbonosa de las muestras, ya que presenta recuperaciones similares que la flotación SR, únicamente muestra una ligera ventaja en el compósito 2 y 3. En el compósito 5 la flotación SR y RF muestran una recuperación similar de plomo mientras que la RFQ muestra baja recuperación debido al arrastre generado en la etapa de pre-flotación.



**Figura 64.** Comparativa de recuperaciones utilizando el método interpolación por IDW, el cual muestra el comportamiento de la recuperación del plomo respecto a los métodos de remoción utilizados.

---

## 5. CONCLUSIONES

---

A partir de los resultados obtenidos en las diferentes pruebas y los modelos matemáticos desarrollados con el fin de correlacionar el efecto de la materia carbonosa en la recuperación de especies minerales de valor en una flotación plomo-zinc, y establecer herramientas de predicción para su aplicación a yacimientos polimetálicos tipo *stockwork* con mineralización diseminada, es posible establecer las siguientes conclusiones:

Por medio de la caracterización mineralógica identificamos las características de las muestras minerales empleadas en la presente investigación, en las cuales destaca la mineralogía, textura de mena, las estructuras sedimentológicas, el grado de alteración filica y el porcentaje de carbono orgánico. Además de identificar los macerales más abundantes en los horizontes enriquecidos de materia carbonosa, así como su composición y clasificación.

Los minerales de mena de ambas muestras son sulfuros metálicos, entre ellos galena, esfalerita, pirita y calcopirita. Para ambas muestras se observaron diferentes asociaciones entre la galena, esfalerita y ganga, las cuales definieron el comportamiento en la flotación con un incremento global mayor de todas las especies de valor.

Los compósitos minerales se comportan de manera distinta en el procesamiento de minerales en la etapa de trituración, molienda y flotación. Respecto a la muestra ACO, ésta genera más finos en la etapa de trituración, necesita un menor tiempo residencia en el molino y tiene las más bajas recuperaciones en la etapa de flotación de minerales; en contraste con la muestra BCO.



El incremento en el grado de alteración filica de las rocas presentes en las muestras, confiere una diferencia en el comportamiento en el proceso de molienda, debido al aumento en la cantidad de cuarzo, lo que eleva la dureza de la roca y por consiguiente aumenta significativamente el tiempo necesario de residencia en el molino para tener una molienda óptima. La diferencia en el tiempo de molienda necesario para lograr el P80 de 125  $\mu\text{m}$  entre la muestra menos alterada (ACO) y la muestra más alterada (BCO) es de aproximadamente 6 minutos.

El contenido de materia carbonosa reduce o inhibe los efectos de los reactivos de flotación, principalmente del espumante y colectores, lo cual impacta directamente en las condiciones necesarias para flotar efectivamente los minerales de interés, afectando principalmente la generación de espuma y su estabilidad en la celda; adsorbe los reactivos colectores evitando que estos se adhieran a las partículas de valor anulando la generación de la hidrofobicidad necesaria para flotarlas.

Las comparaciones de los métodos utilizados para remover la materia carbonosa posterior a la flotación, sugiere que la remoción física (RF) es el método más eficaz debido a la selectividad para retirar a la materia carbonosa y por no arrastrar metales de valor al concentrado de carbón. Por consiguiente, las recuperaciones más altas en todos los compósitos fueron obtenidas posterior a la RF, la cual, permite que los reactivos puedan realizar su función específica, evitando que los valores acaben en las colas del proceso. La remoción fisicoquímica (RFQ) afecta la recuperación de metales de valor cuando el porcentaje de carbono orgánico es bajo ( $<0.14\%$ ), ya que este proceso arrastra minerales de valor al concentrado de carbón, este método es recomendable para menas con mayor porcentaje de carbono orgánico, sin rebasar el  $0.30\%$ . Para contenidos mayores de materia carbonosa deberán evaluar el efecto de la dosificación de espumante.

Con la información obtenida durante la caracterización y el proceso metalúrgico, los datos fueron analizados estadísticamente para formular modelaciones matemáticas para predecir el comportamiento metalúrgico con base en los parámetros geológicos seleccionados, por lo cual para obtener el tiempo de molienda necesario obtuvimos un modelo matemático utilizando el porcentaje de carbonato de calcio en la muestra, así como un modelo multivariado en el cual además del carbonato de calcio se incluye la relación entre el % tectosilicatos / % filosilicatos en la muestra. Los modelos de flotación fueron generados a partir de la recuperación metalúrgica de plomo en función del contenido de carbono orgánico y de la alteración filica.

La estrategia metodológica y la selección de variables geológicas y metalúrgicas para la generación de los modelos matemáticos expuestos en el presente trabajo, requiere de una validación a través de su aplicación a diferentes yacimientos que presente problemáticas similares, con el fin de complementar y fortalecer los resultados alcanzados.

---

## REFERENCIAS

---

- Aguilar, J. (2020). *Evaluación de reactivos orgánicos para la depresión de carbón en la flotación de galena y calcopirita*. (Tesis de maestría). San Luis Potosí, México.
- Almond, M. (2016). Historia y evolución de la exploración del depósito de clase mundial “el peñasquito”.
- Barboza-Gudiño, J. R., Hoppe, M., Gómez-Anguiano, M., Martínez-Macías P. R., Aportaciones para la interpretación estratigráfica y estructural de la porción noroccidental de la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, México. (2004). *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 21(3), 299–319.
- Barraza, J., (2011). Avances de flotación de carbónes: Aplicación en Colombia. *Escuela de ingeniería química, Universidad del Valle de Cali, Colombia. III Congreso Brasileiro de Carbones, Brasil*.
- Blaschke, W. S. (1996). *New trends in coal preparation technologies and equipment*. Kraków, Polonia. Gordon and Breach Publishers.
- Campa M.F., and Coney P.J. (1983), Tectonostratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico: *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 20, p. 1040–1051.
- Corbett, G.J., (2017), *Epithermal Au-Ag and porphyry Cu-Au exploration – short course manual: unpublished, Sept 2017 edition, www.corbettgeology.com*
- Cortés, V. (s.f.). *Carbón*. Recuperado de: <https://docplayer.es/9596492-Carbon-prof-dr-vicente-j-cortes.html>
- De Cserna, Z., (1956), Tectónica de la Sierra Madre Oriental de México, entre Torreón y Monterrey: XX Congreso Geológico Internacional: Contribución del Instituto Nacional para la Investigación de Recursos Minerales de México.
- Liz M., Fernández R., Faubell M., (1992). Presencia de carbono orgánico en las menas de plomo y zinc, y su importancia en el beneficio. *Minería y Geología, Revista digital científico tecnológica*. <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/469/0>
- Enciso de la Vega, S., (1963), Resumen de la Geología de la hoja Nazas, Estado de Durango 13Rk (6), escala 1: 100,000, México: Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Franco, J. y Palacios, N. (2012). *diferenciación de contenidos de carbon organico por flotación segregante de un concentrado final de cobre en la presencia de dextrina consultora virgen de chapi*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Centro de Perú, Huancayo, Perú.

- Guerrero, A. (2017). *Comportamiento termoplástico de los macerales de carbones coquinizables y su implicación en las propiedades del coque* (Tesis doctoral). Universidad de Oviedo, Asturias, España.
- Guerrero, J. (2012). *Cinética de flotación de los lodos finos de carbón de la mina Cerrajón (Guajira) utilizando celda de flotación* (Tesis de maestría). Universidad del Valle, Cali, Colombia.
- Gómez, O., Carmona, I. y Bustamante, O. (2007). Análisis de liberación de los grupos macerales del carbón: carbones colombianos. *Boletín de ciencias de la tierra. Vol. 21*, p. 75-85.
- Imlay, R.W., (1936), Evolution of the Coahuila Peninsula, Mexico: Part IV, Geology of the western part of the Sierra de Parras: Geological Society of America Bulletin, 47, 1091–1152.
- Junta de Castilla y León. (2009). *El carbón*. Recuperado de: <https://www.siemcalsa.com/images/pdf/El%20Carbon.pdf>
- Johnston, A. (2016), septiembre 15). Geometalúrgia en el contexto peruano. file:///C:/Users/Dany/Desktop/MAESTRIA/Protocolo/Bibliograf%C3%ADa/Metalurgia/jonhstone.pdf
- Marchase-García, A., Conceptos y aplicaciones de planificación geometalúrgica. (2005). *Revista Minería*, 1(330), 28–35.
- Mariño, J. y Mojica, A. (2014). Relación entre la petrografía del carbón y el contenido de gases en la cuenca de Amagá. *Revista de la Facultad de Ingeniería. Vol. 23*, P. 33-43.
- Laskowski, J. S. (2001). *Coal flotation and fine coal utilization*. Elsevier Science & Technology.
- Leonard, J. W. (1991). *Coal preparation*. Littleton Colorado, USA. *Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.*
- Li, C., Somasundaran, P. (1993). Role of electrical double layer forces and hydrophobicity in coal flotation in sodium chloride solutions. *Energy Fuels* 7, 244-248.
- López-Aburto, V. M., (2004). *Principios básicos en los procesos para la concentración de minerales*. Universidad Autónoma de México, México, 346 p.
- Luna, E. (2018). *Estudio de la flotabilidad del carbón en columna de flotación utilizando salmueras como medio acuoso* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

- Ortega-Gutiérrez, F., Mitre-Salazar, L. M., Roldán-Quintana J., Aranda-Gómez, J. J., Morán-Zenteno, D., Alaniz-Álvarez, S. A, and Nieto-Samaniego, Á. F., 1992, Texto explicativo de la quinta edición de la carta geológica de la República Mexicana escala 1:2'000,000: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología y SEMIP Consejo de Recursos Minerales.
- Ortega-Gutiérrez, F., Ruiz, J., and Centeno-García, E., (1995), Oaxaquia, a Proterozoic micro-continent accreted to North America during the Paleozoic: *Geology*, 23, p. 1127- 1130.
- Oyarzun, R., Higuera, P. & Lillo, J. (2011). *Minería Ambiental: Una Introducción a los Impactos y su Remediación*. Ediciones GEMM - Aula2punto.net, [http://www.aulados.net/GEMM/Libros\\_Manuales/index\\_libros.html](http://www.aulados.net/GEMM/Libros_Manuales/index_libros.html)
- Parnell, J., Kucha, H. y Landais, P. (1993). “Bitumen in Ore Deposits”, Springer-Verlag.
- Pearson, M.F., Clark, K.F., Porter, E.W., (1988), Mineralogy, fluid characteristics, and silver distribution at Real de Angeles, Zacatecas, Mexico: *Economic Geology*, 83, 1737-1759.
- PEMEX, Petróleos Mexicanos, (1988), *Estratigrafía de la República Mexicana: Mesozoico: México, D.F.*, Subdirección de producción primaria, Coordinación ejecutiva de exploración, Informe Inédito, 229
- Pinzón-Sotelo, M. (2012). *Análisis sedimentológico y petrográfico de la Formación Caracól (Cretácico tardío), sierra madre oriental, NE de zacatecas*. (Tesis Maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León, Linares, Nuevo León.
- Piñeres J., Barraza J., Solarte M., Orozco M., Colon P. (2012). Cinética de flotación de la materia orgánica en carbones del Cerrejón (Guajira) utilizando una columna deflotación. *Ingeniería y competitividad*. Volumen 14, No. 2, p. 103 – 109.
- Preece R. K., (2006). Use of point samples to estimate the spatial distribution of hardness in the Escondida porphyry copper deposit, Chile. *Proceedings of SAG 2006*. Vancouver. pp. 391-410.
- Raisz, E. (1964), *Landforms of Mexico* (mapa en escala 1:3 000 000), Cambridge, Mass. (publicación anterior en 1959).
- Rocha-Rocha, M. (2015). *Metallogenesis of the peñasquito polymetallic deposit: a contribution to the understanding of the magmatic ore system* (Tesis doctoral). University of Nevada, Reno, Arizona.
- Rogers, C. L., De Cserna, Z., Talaver, E., and Ulloa, S., 1956, *Geology and Phosphate Deposits of Concepcion del Oro District, Zacatecas, Mexico: Geological survey Bulletin 1037-A*.

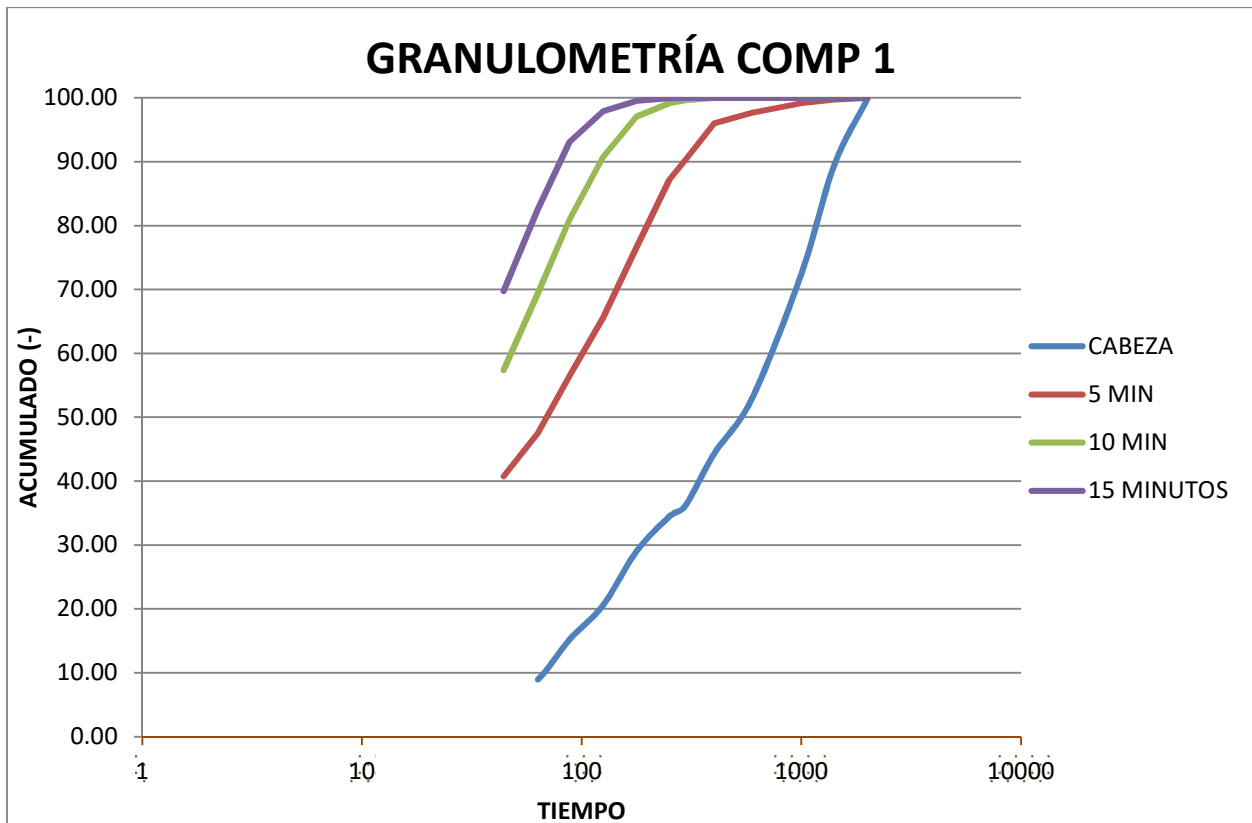
- Romero-Valle, J. M. (2017). Ensayo de un modelo geometalúrgico para la zona de sulfuros primarios profundos de la mina la herradura en Sonora, México. Universidad de Sonora.
- López-Aburto, V. M., (2004). Principios básicos en los procesos para la concentración de minerales. México, Facultad de Ingeniería, 346 p.
- López-Saucedo, F., Treviño, E., De la Garza, I., Ramos, K., Camacho, L. y Equiwa, F. (2014). Efecto de soluciones de KI, NaCl, MgCl<sub>2</sub>, y Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, en la distribución de tamaños de burbujas y su relación con la flotación de partículas de carbón y material mineral. *Revista mexicana de ingeniería química*, Vol. 15 (1), p. 221-229.
- Schwarze, J., (2017). Pretratamiento de material bituminoso previo a flotación. *Universidad de Chile*, Santiago de Chile.
- SGS Mineral Service, (2007). Visión general de la geometalúrgia. Recuperado de: <https://www.sgsminerals.com.ar/-/media/local/mexico/documents/flyers-and-leaflets/sgs-min-329-geometalurgia-sp-12-02.pdf>
- Smith T., L. L. (2008). Removal of organic carbon with a Jameson Cell at Red Dog Mina. *40th. Annual Meeting of the Canadian Mineral Processing*, 22-24. Recuperado el 20 de febrero de 2018
- Suarez-Ruiz, I., 2012. Organic Petrology: An Overview, In: Al Joboury, A. (Ed.), *Petrology, news perspectives and application*. In Tech, pp. 199-225
- Tarback, E., Lutgens, F. (2005). *Ciencias de la tierra*. Madrid, España: Pearson Education.
- Yonggai, L. (2019). Effect of Dextrina on the Adsorption Behavior and Surface Characteristics of Sub-Bituminous Coal and Silica. *ACS Omega* 4, 7231-7236.

# ANEXOS

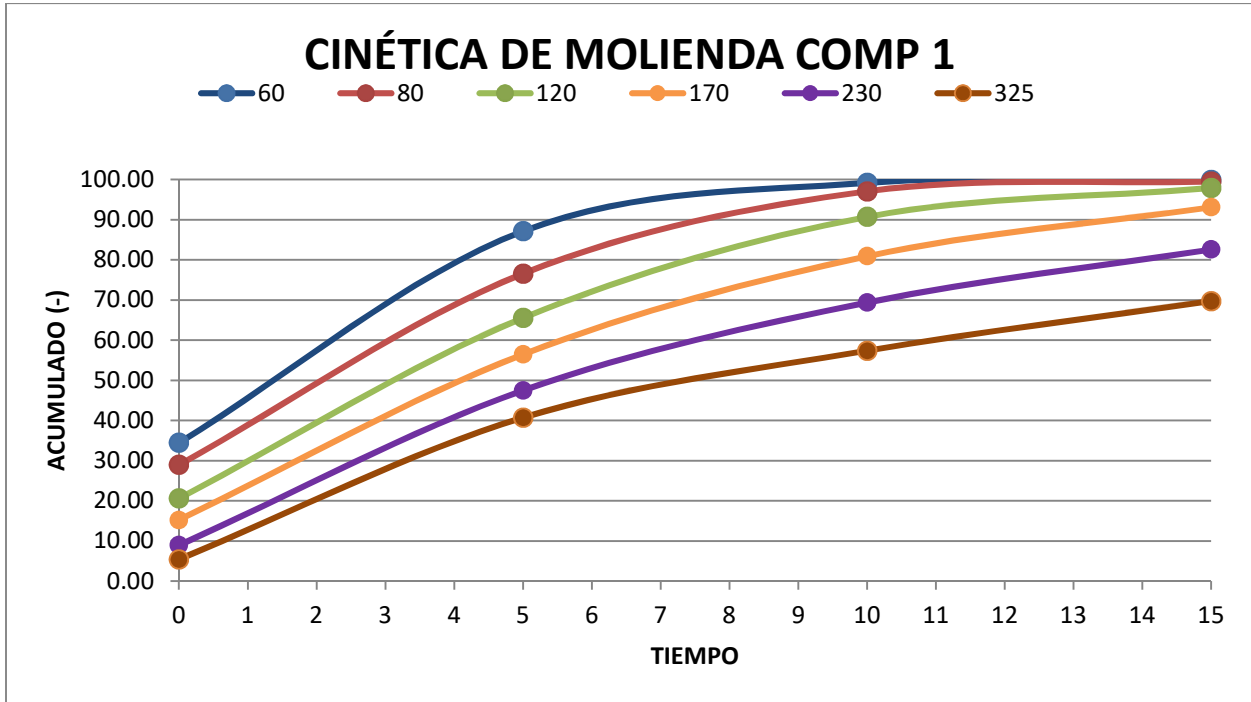
## APÉNDICE I. CÁLCULO DE TIEMPO DE MOLIENDA

### COMPÓSITO 1

COMPÓSITO 1																	
		CABEZA				5				10				15			
malla	micras	peso, g	peso, %	AC (+)	AC (-)	peso, g	peso, %	AC (+)	AC (-)	peso, g	peso, %	AC (+)	AC (-)	peso, g	peso, %	AC (+)	AC (-)
10	2000	0.60	0.09	0.09	99.91	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00
14	1410	73.00	10.43	10.51	89.49	2.50	0.25	0.25	99.75	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00
18	1000	118.80	16.97	27.49	72.51	5.50	0.55	0.80	99.20	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00
30	595	137.00	19.57	47.06	52.94	14.90	1.49	2.29	97.71	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00
40	400	60.40	8.63	55.69	44.31	17.00	1.70	3.99	96.01	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00
50	297	56.30	8.04	63.73	36.27	56.30	5.63	9.62	90.38	3.50	0.35	0.35	99.65	0.00	0.00	0.00	100.00
60	250	12.50	1.79	65.51	34.49	31.80	3.18	12.80	87.20	4.40	0.44	0.79	99.21	0.40	0.04	0.04	99.96
80	177	38.30	5.47	70.99	29.01	105.80	10.58	23.38	76.62	21.20	2.12	2.91	97.09	4.10	0.41	0.45	99.55
120	125	58.70	8.39	79.37	20.63	110.10	11.01	34.39	65.61	63.20	6.32	9.23	90.77	16.20	1.62	2.07	97.93
170	88	37.50	5.36	84.73	15.27	90.90	9.09	43.48	56.52	98.00	9.80	19.03	80.97	47.80	4.78	6.85	93.15
230	63	44.00	6.29	91.01	8.99	89.70	8.97	52.45	47.55	115.30	11.53	30.56	69.44	105.30	10.53	17.38	82.62
325	44	24.60	3.51	94.53	5.47	67.90	6.79	59.24	40.76	120.20	12.02	42.58	57.42	128.50	12.85	30.23	69.77
-325	-44	38.3	5.471428571	100	0	407.6	40.76	100	0	574.2	57.42	100	0	697.7	69.77	100	0
		700.00	100.00			1000.00	100.00			1000.00	100.00			1000.00	100.00		



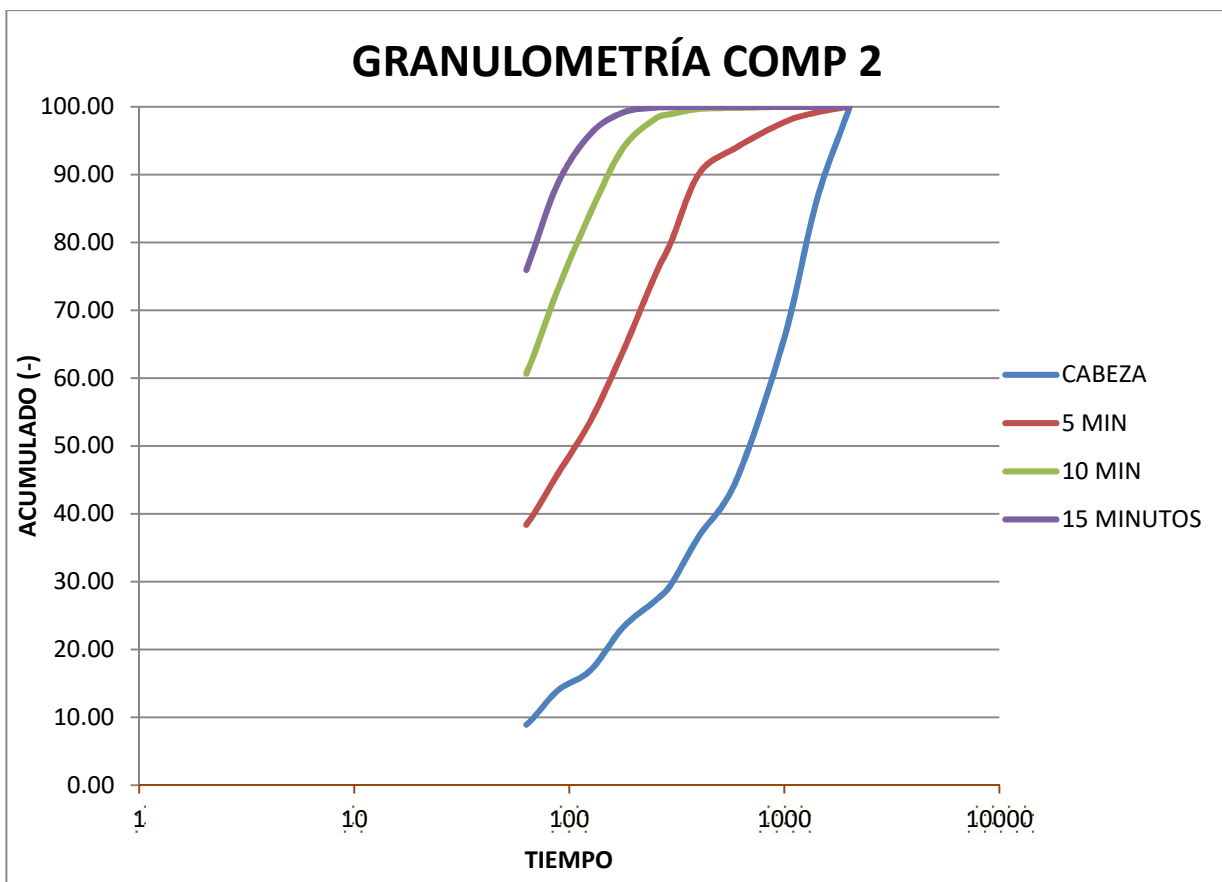
TIEMPO MIN	TIEMPO MIN	Malla					
		60	80	120	170	230	325
0	CABEZA	34.49	29.01	20.63	15.27	8.99	5.47
5	5	87.20	76.62	65.61	56.52	47.55	40.76
10	10	99.21	97.09	90.77	80.97	69.44	57.42
15	15	99.96	99.55	97.93	93.15	82.62	69.77



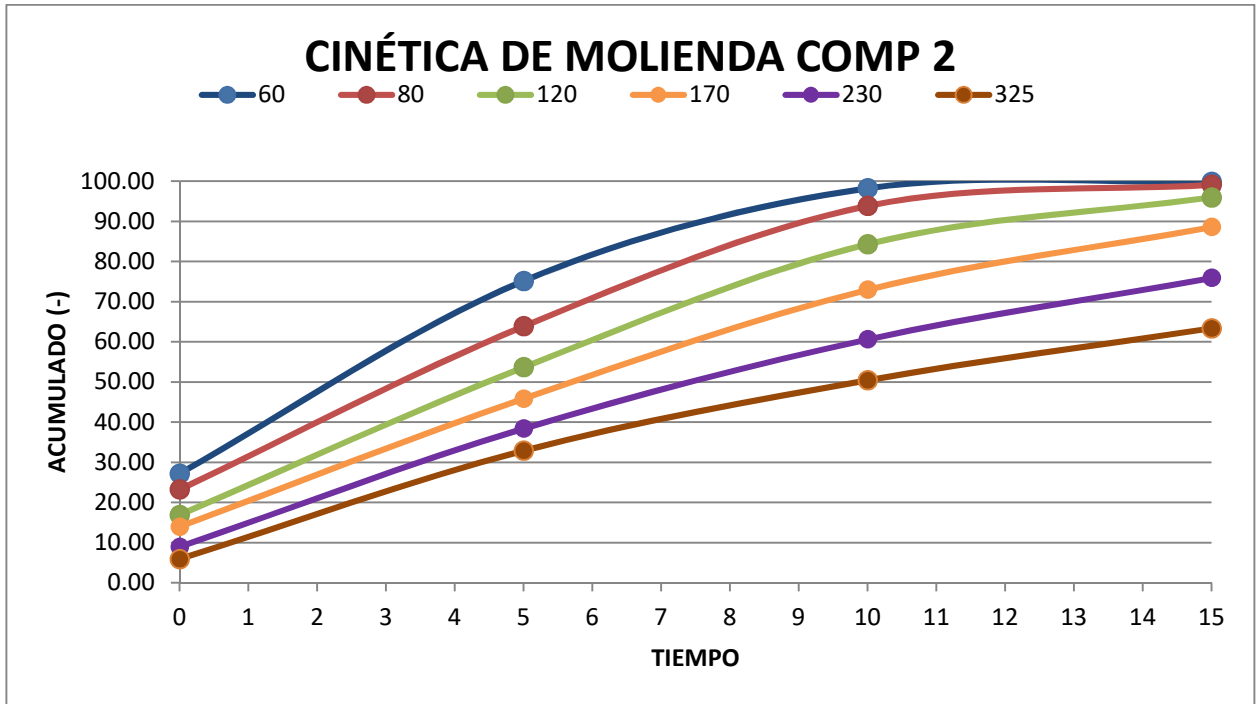


## COMPÓSITO 2

		COMPÓSITO 2															
		CABEZA				5				10				15			
malla	micras	peso, g	peso, %	AC (+)	AC (-)	peso, g	peso, %	AC (+)	AC (-)	peso, g	peso, %	AC (+)	AC (-)	peso, g	peso, %	AC (+)	AC (-)
10	2000	1.4	0.20	0.20	99.80	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00
14	1410	95.6	13.66	13.86	86.14	8.30	0.83	0.83	99.17	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00
18	1000	140.6	20.09	33.94	66.06	14.20	1.42	2.25	97.75	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00
30	595	148.3	21.19	55.13	44.87	37.70	3.77	6.02	93.98	1.40	0.14	0.14	99.86	0.00	0.00	0.00	100.00
40	400	57	8.14	63.27	36.73	38.50	3.85	9.87	90.13	1.60	0.16	0.30	99.70	0.00	0.00	0.00	100.00
50	297	49.6	7.09	70.36	29.64	100.20	10.02	19.89	80.11	7.50	0.75	1.05	98.95	0.40	0.04	0.04	99.96
60	250	17.1	2.44	72.80	27.20	49.20	4.92	24.81	75.19	7.10	0.71	1.76	98.24	0.80	0.08	0.12	99.88
80	177	27.6	3.94	76.74	23.26	112.80	11.28	36.09	63.91	43.40	4.34	6.10	93.90	7.20	0.72	0.84	99.16
120	125	44.2	6.31	83.06	16.94	102.20	10.22	46.31	53.69	95.50	9.55	15.65	84.35	31.60	3.16	4.00	96.00
170	88	20.8	2.97	86.03	13.97	78.30	7.83	54.14	45.86	113.40	11.34	26.99	73.01	73.80	7.38	11.38	88.62
230	63	35.2	5.03	91.06	8.94	74.40	7.44	61.58	38.42	123.60	12.36	39.35	60.65	126.70	12.67	24.05	75.95
325	44	21.1	3.01	94.07	5.93	55.00	5.50	67.08	32.92	101.90	10.19	49.54	50.46	125.50	12.55	36.60	63.40
-325	-44	415	5.928571429	100	0	329.2	32.92	100	0	504.6	50.46	100	0	634	63.4	100	0
		700.00	100.00			1000.00	100.00			1000.00	100.00			1000.00	100.00		

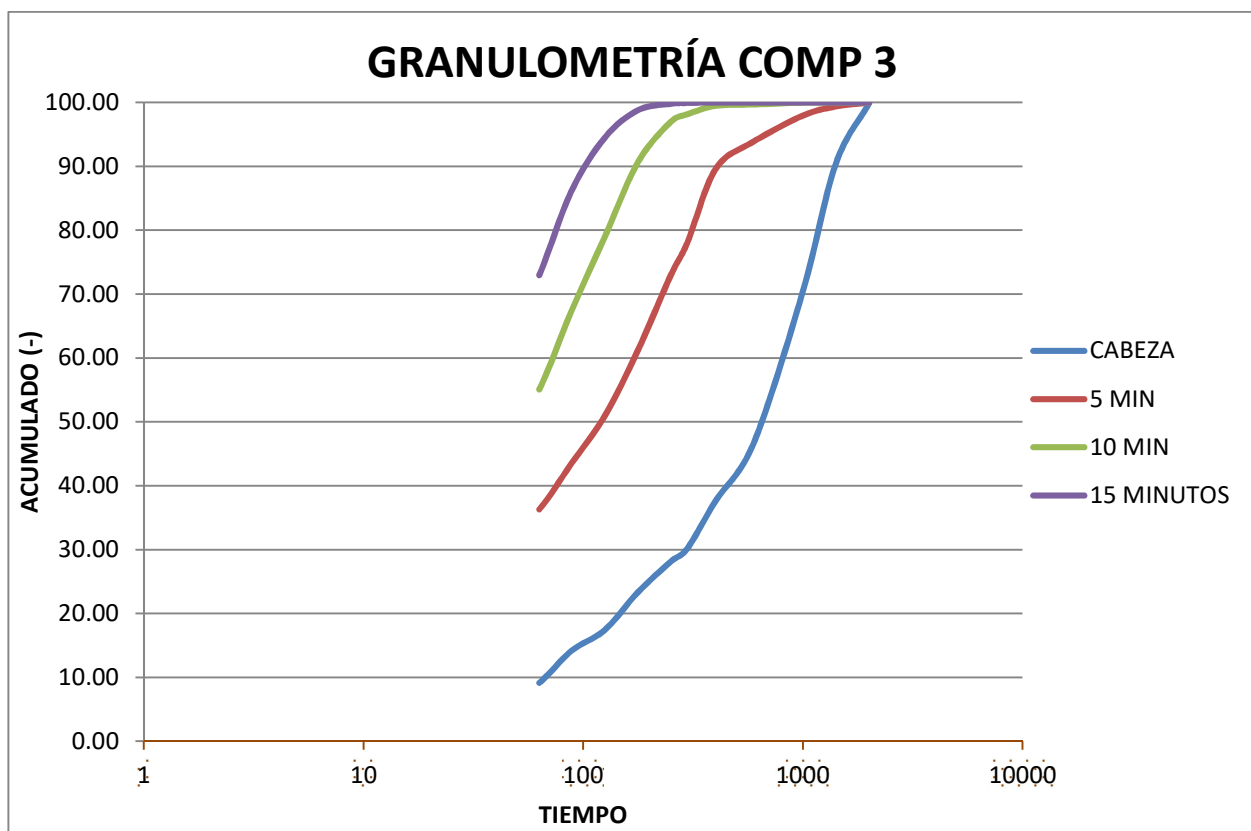


		Malla					
TIEMPO MIN	TIEMPO MIN	60	80	120	170	230	325
0	CABEZA	27.20	23.26	16.94	13.97	8.94	5.93
5	5	75.19	63.91	53.69	45.86	38.42	32.92
10	10	98.24	93.90	84.35	73.01	60.65	50.46
15	15	99.88	99.16	96.00	88.62	75.95	63.40

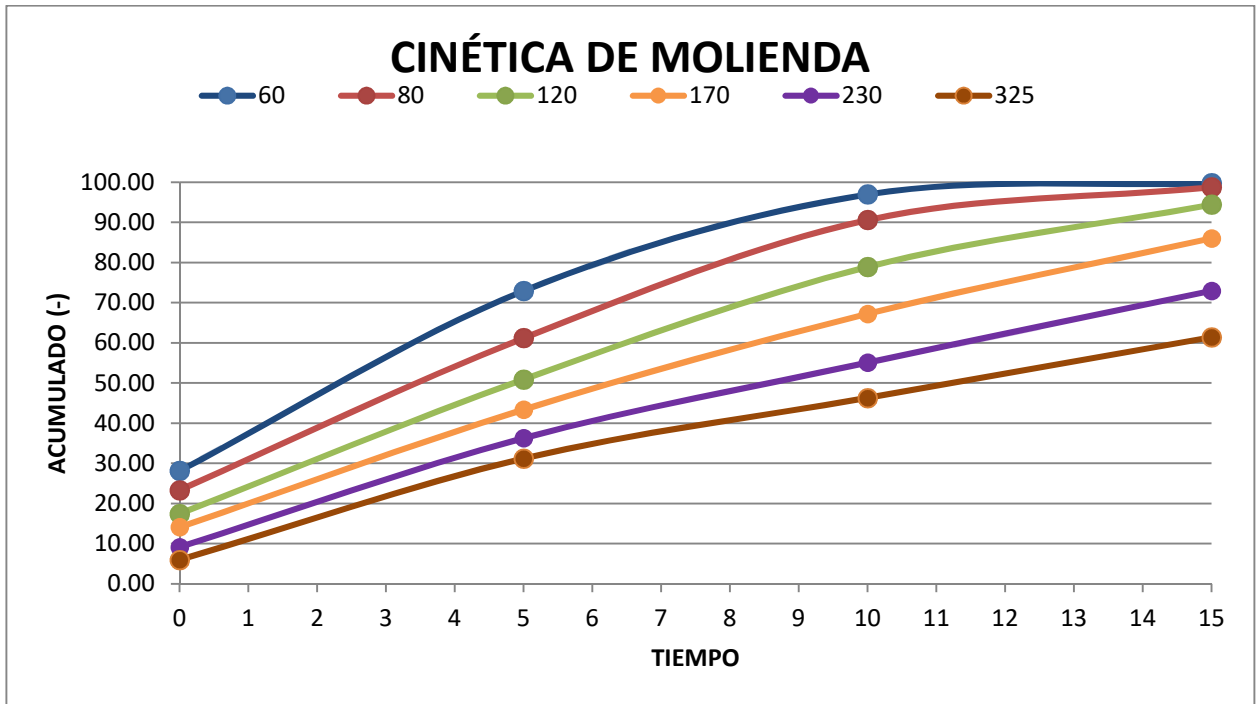


## COMPÓSITO 3

COMPÓSITO 3																	
		CABEZA				5				10				15			
malla	micras	peso, g	peso, %	AC (+)	AC (-)	peso, g	peso, %	AC (+)	AC (-)	peso, g	peso, %	AC (+)	AC (-)	peso, g	peso, %	AC (+)	AC (-)
10	2000	0.4	0.06	0.06	99.94	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00
14	1410	66.6	9.51	9.57	90.43	6.00	0.60	0.60	99.40	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00
18	1000	139.2	19.89	29.46	70.54	14.10	1.41	2.01	97.99	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00
30	595	167.4	23.91	53.37	46.63	40.80	4.08	6.09	93.91	2.80	0.28	0.28	99.72	0.00	0.00	0.00	100.00
40	400	62.8	8.97	62.34	37.66	43.00	4.30	10.39	89.61	2.10	0.21	0.49	99.51	0.00	0.00	0.00	100.00
50	297	52.4	7.49	69.83	30.17	115.70	11.57	21.96	78.04	13.30	1.33	1.82	98.18	0.80	0.08	0.08	99.92
60	250	14.1	2.01	71.84	28.16	50.60	5.06	27.02	72.98	11.80	1.18	3.00	97.00	1.30	0.13	0.21	99.79
80	177	33.6	4.80	76.64	23.36	117.60	11.76	38.78	61.22	63.50	6.35	9.35	90.65	10.10	1.01	1.22	98.78
120	125	41.5	5.93	82.57	17.43	102.90	10.29	49.07	50.93	116.80	11.68	21.03	78.97	43.10	4.31	5.53	94.47
170	88	22.9	3.27	85.84	14.16	75.10	7.51	56.58	43.42	117.10	11.71	32.74	67.26	84.10	8.41	13.94	86.06
230	63	34.9	4.99	90.83	9.17	71.20	7.12	63.70	36.30	121.50	12.15	44.89	55.11	130.60	13.06	27.00	73.00
325	44	22.5	3.21	94.04	5.96	50.90	5.09	68.79	31.21	88.00	8.80	53.69	46.31	115.70	11.57	38.57	61.43
-325	-44	41.7	5.957142857	100	0	312.1	31.21	100	0	463.1	46.31	100	0	614.3	61.43	100	0
		700.00	100.00			1000.00	100.00			1000.00	100.00			1000.00	100.00		

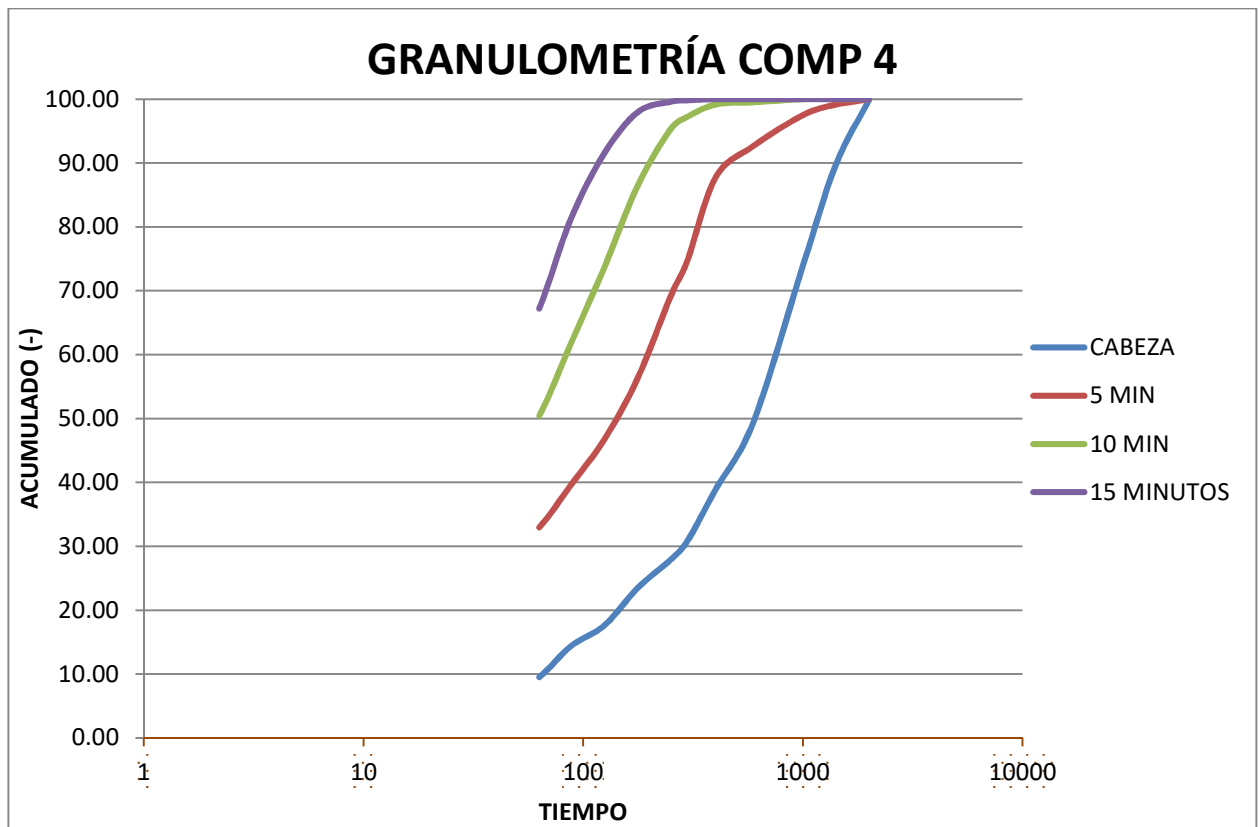


		Malla					
TIEMPO MIN	TIEMPO MIN	60	80	120	170	230	325
0	CABEZA	28.16	23.36	17.43	14.16	9.17	5.96
5	5	72.98	61.22	50.93	43.42	36.30	31.21
10	10	97.00	90.65	78.97	67.26	55.11	46.31
15	15	99.79	98.78	94.47	86.06	73.00	61.43

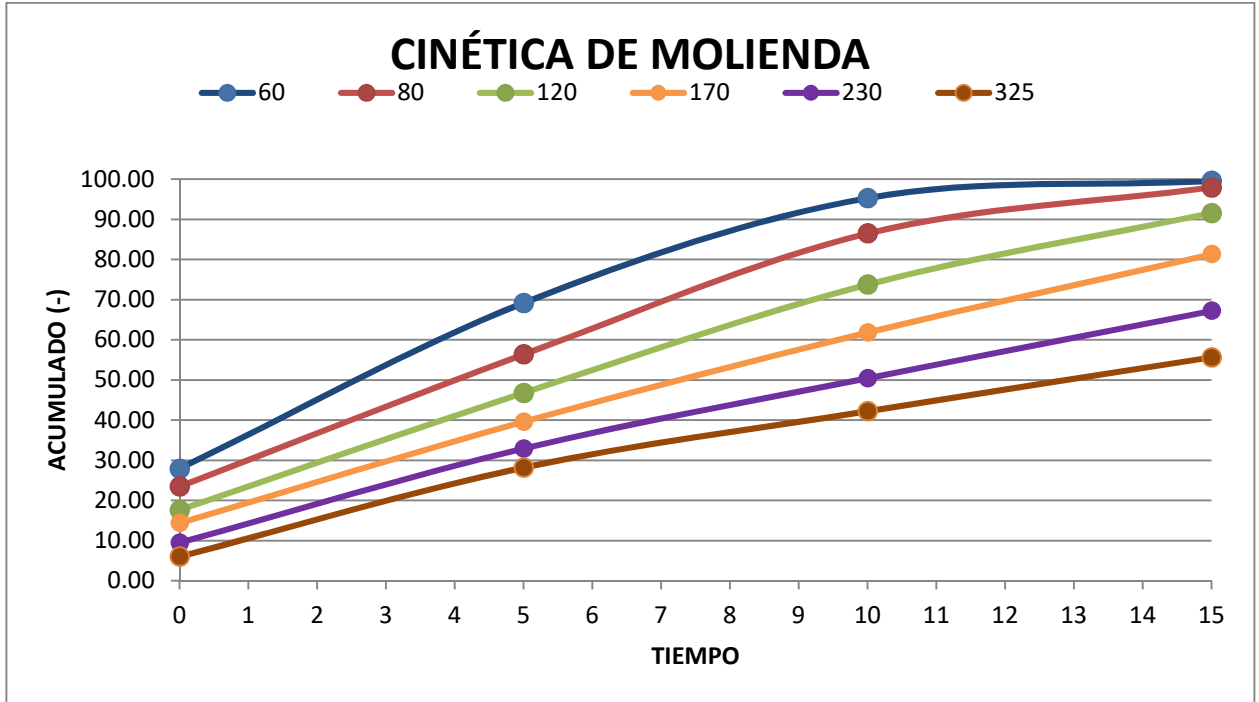


## COMPÓSITO 4

COMPÓSITO 4																	
		CABEZA				5				10				15			
mall	micras	peso_g	peso_%	AC(+)	AC(-)	peso_g	peso_%	AC(+)	AC(-)	peso_g	peso_%	AC(+)	AC(-)	peso_g	peso_%	AC(+)	AC(-)
10	2000	0.4	0.06	0.06	99.94	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00
14	1410	71.4	10.20	10.26	89.74	8.30	0.83	0.83	99.17	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00
18	1000	110.2	15.74	26.00	74.00	16.40	1.64	2.47	97.53	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00
30	595	171.6	24.51	50.51	49.49	48.30	4.83	7.30	92.70	4.90	0.49	0.49	99.51	0.00	0.00	0.00	100.00
40	400	74.1	10.59	61.10	38.90	49.40	4.94	12.24	87.76	3.40	0.34	0.83	99.17	0.00	0.00	0.00	100.00
50	297	56.7	8.10	69.20	30.80	131.10	13.11	25.35	74.65	19.40	1.94	2.77	97.23	1.80	0.18	0.18	99.82
60	250	20.1	2.87	72.07	27.93	54.30	5.43	30.78	69.22	18.90	1.89	4.66	95.34	2.30	0.23	0.41	99.59
80	177	30.9	4.41	76.49	23.51	128.20	12.82	43.60	56.40	88.10	8.81	13.47	86.53	16.00	1.60	2.01	97.99
120	125	41	5.86	82.34	17.66	95.90	9.59	53.19	46.81	127.50	12.75	26.22	73.78	63.90	6.39	8.40	91.60
170	88	22.8	3.26	85.60	14.40	71.50	7.15	60.34	39.66	119.20	11.92	38.14	61.86	102.30	10.23	18.63	81.37
230	63	34.2	4.89	90.49	9.51	67.00	6.70	67.04	32.96	113.80	11.38	49.52	50.48	141.20	14.12	32.75	67.25
325	44	24.3	3.47	93.96	6.04	47.20	4.72	71.76	28.24	82.30	8.23	57.75	42.25	115.80	11.58	44.33	55.67
-325	-44	42.3	6.042857143	100	0	282.4	28.24	100	0	422.5	42.25	100	0	556.7	55.67	100	0
		700.00	100.00			1000.00	100.00			1000.00	100.00			1000.00	100.00		

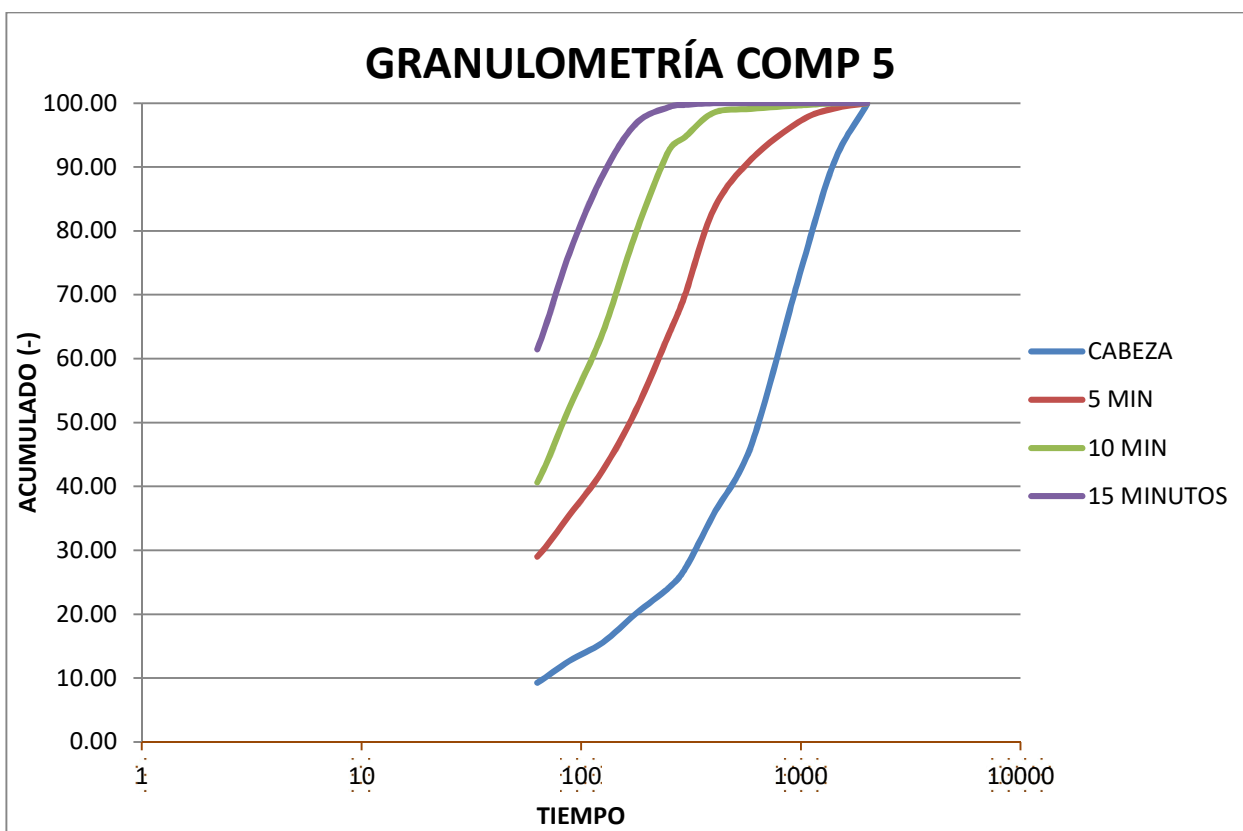


TIEMPO MIN	TIEMPO MIN	Malla					
		60	80	120	170	230	325
0	CABEZA	27.93	23.51	17.66	14.40	9.51	6.04
5	5	69.22	56.40	46.81	39.66	32.96	28.24
10	10	95.34	86.53	73.78	61.86	50.48	42.25
15	15	99.59	97.99	91.60	81.37	67.25	55.67

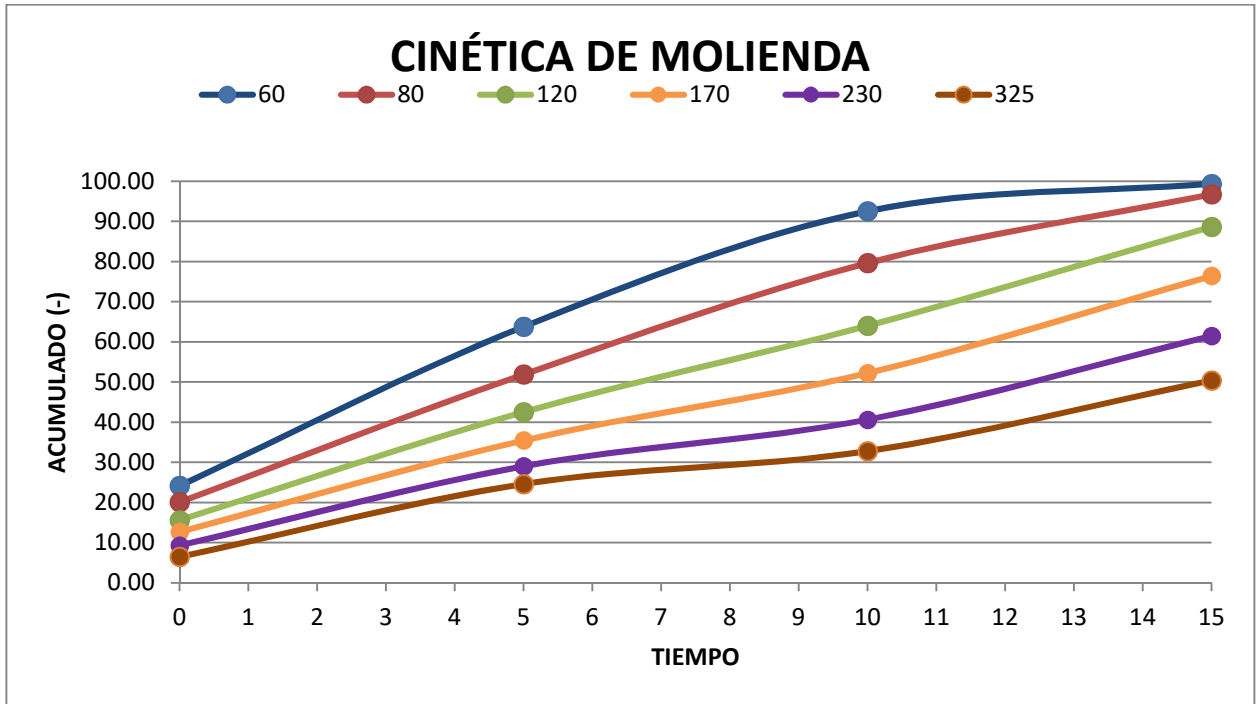


## COMPÓSITO 5

		COMPÓSITO 5															
		CABEZA				5				10				15			
malla	micras	peso, g	peso, %	AC(+)	AC(-)	peso, g	peso, %	AC(+)	AC(-)	peso, g	peso, %	AC(+)	AC(-)	peso, g	peso, %	AC(+)	AC(-)
10	2000	0.6	0.09	0.09	99.91	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00
14	1410	64.7	9.24	9.33	90.67	8.20	0.82	0.82	99.18	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00
18	1000	117.1	16.73	26.06	73.94	18.90	1.89	2.71	97.29	3.10	0.31	0.31	99.69	0.00	0.00	0.00	100.00
30	595	191.3	27.33	53.39	46.61	60.10	6.01	8.72	91.28	5.60	0.56	0.87	99.13	0.00	0.00	0.00	100.00
40	400	76.5	10.93	64.31	35.69	79.00	7.90	16.62	83.38	6.10	0.61	1.48	98.52	0.00	0.00	0.00	100.00
50	297	59.4	8.49	72.80	27.20	132.80	13.28	29.90	70.10	37.90	3.79	5.27	94.73	2.50	0.25	0.25	99.75
60	250	21.2	3.03	75.83	24.17	62.80	6.28	36.18	63.82	21.70	2.17	7.44	92.56	3.70	0.37	0.62	99.38
80	177	28.4	4.06	79.89	20.11	118.70	11.87	48.05	51.95	128.60	12.86	20.30	79.70	25.90	2.59	3.21	96.79
120	125	31.6	4.51	84.40	15.60	94.30	9.43	57.48	42.52	156.70	15.67	35.97	64.03	80.80	8.08	11.29	88.71
170	88	20.3	2.90	87.30	12.70	70.20	7.02	64.50	35.50	117.70	11.77	47.74	52.26	122.70	12.27	23.56	76.44
230	63	23.8	3.40	90.70	9.30	64.60	6.46	70.96	29.04	116.40	11.64	59.38	40.62	149.40	14.94	38.50	61.50
325	44	19.7	2.81	93.51	6.49	44.10	4.41	75.37	24.63	78.00	7.80	67.18	32.82	110.80	11.08	49.58	50.42
-325	-44	45.4	6.485714286	100	0	246.3	24.63	100	0	328.2	32.82	100	0	504.2	50.42	100	0
		700.00	100.00			1000.00	100.00			1000.00	100.00			1000.00	100.00		



		Malla					
TIEMPO MIN	TIEMPO MIN	60	80	120	170	230	325
0	CABEZA	24.17	20.11	15.60	12.70	9.30	6.49
5	5	63.82	51.95	42.52	35.50	29.04	24.63
10	10	92.56	79.70	64.03	52.26	40.62	32.82
15	15	99.38	96.79	88.71	76.44	61.50	50.42





## APÉNDICE II. BALANCES METALÚRGICOS

### FLOTACIÓN PLOMO-ZINC SIN REMOCIÓN

Compo 1			LEY						DISTRIBUCIÓN						CONTENIDO					
	Peso (g)	Peso (%)	Pb (%)	Cu (%)	Zn (%)	Fe(%)	As (ppm)	Sb (ppm)	Pb	Cu	Zn	Fe	As	Sb	Pb	Cu	Zn	Fe	As	Sb
Primario Pb	16.3	1.6	1.50	0.44	0.84	3.36	0.08	0.39	6.79	15.36	2.12	1.51	4.56	35.63	0.024	0.007	0.014	0.055	0.001	0.006
Agotativo Pb	18.2	1.8	1.53	0.23	0.99	4.66	0.06	0.17	7.70	8.69	2.79	2.34	3.53	17.70	0.028	0.004	0.018	0.085	0.001	0.003
Primario Zn	19.3	1.9	0.79	0.18	6.72	4.79	0.05	0.11	4.21	7.24	20.07	2.55	3.38	12.17	0.015	0.003	0.130	0.092	0.001	0.002
Agotativo Zn	11.3	1.1	1.19	0.12	6.34	17.90	0.09	0.08	3.73	2.91	11.09	5.58	3.60	5.30	0.013	0.001	0.072	0.202	0.001	0.001
Colas	934.9	93.5	0.30	0.03	0.44	3.41	0.03	0.01	77.57	65.80	63.94	88.01	84.94	29.20	0.280	0.031	0.413	3.188	0.025	0.005
1000.00	100.00		0.36	0.05	0.65	3.62	0.03	0.02	100	100	100	100	100	100	0.36	0.05	0.65	3.62	0.03	0.02
Cabeza analizada			0.39	0.06	0.68	3.55	0.03	0.02												

Compo 2			LEY						DISTRIBUCIÓN						CONTENIDO					
	Peso (g)	Peso (%)	Pb (%)	Cu (%)	Zn (%)	Fe(%)	As (ppm)	Sb (ppm)	Pb	Cu	Zn	Fe	As	Sb	Pb	Cu	Zn	Fe	As	Sb
Primario Pb	11.0	1.1	6.90	0.70	1.75	2.14	0.13	0.58	23.10	18.50	2.19	0.53	4.50	51.36	0.076	0.008	0.019	0.024	0.001	0.006
Agotativo Pb	20.6	2.1	4.41	0.17	1.54	13.20	0.14	0.14	27.64	8.41	3.63	6.08	9.19	22.70	0.091	0.004	0.032	0.272	0.003	0.003
Primario Zn	34.1	3.4	0.58	0.09	10.32	12.60	0.10	0.03	6.02	7.29	40.15	9.61	10.82	9.06	0.020	0.003	0.352	0.430	0.003	0.001
Agotativo Zn	27.3	2.7	0.64	0.07	4.52	18.90	0.15	0.02	5.33	4.79	14.08	11.54	13.37	5.19	0.018	0.002	0.123	0.516	0.004	0.001
Colas	907.0	90.7	0.14	0.03	0.39	3.56	0.02	0.00	37.91	61.01	39.95	72.24	62.12	11.68	0.125	0.025	0.350	3.229	0.019	0.001
1000.00	100.00		0.33	0.04	0.88	4.47	0.03	0.01	100	100	100	100	100	100	0.33	0.04	0.88	4.47	0.03	0.01
Cabeza analizada			0.35	0.05	0.85	5.37	0.03	0.01												

Compo 3			LEY						DISTRIBUCIÓN						CONTENIDO					
	Peso (g)	Peso (%)	Pb (%)	Cu (%)	Zn (%)	Fe(%)	As (ppm)	Sb (ppm)	Pb	Cu	Zn	Fe	As	Sb	Pb	Cu	Zn	Fe	As	Sb
Primario Pb	31.3	3.1	5.58	0.33	1.90	4.98	0.11	0.25	44.81	22.89	5.25	2.86	10.00	68.54	0.175	0.010	0.059	0.156	0.003	0.008
Agotativo Pb	33.5	3.4	2.28	0.11	1.81	16.40	0.14	0.06	19.62	8.04	5.37	10.08	13.75	18.69	0.076	0.004	0.061	0.549	0.005	0.002
Primario Zn	37.9	3.8	0.70	0.10	19.99	8.79	0.09	0.02	6.81	8.60	67.03	6.11	10.54	8.08	0.027	0.004	0.758	0.333	0.004	0.001
Agotativo Zn	37.4	3.7	0.66	0.06	3.49	22.30	0.20	0.01	6.29	5.23	11.55	15.30	21.97	4.69	0.024	0.002	0.131	0.834	0.007	0.001
Colas	859.9	86.0	0.10	0.03	0.14	4.16	0.02	0.00	22.47	55.24	10.80	65.64	43.75	0.00	0.088	0.025	0.122	3.577	0.015	0.000
1000.00	100.00		0.39	0.05	1.13	5.45	0.03	0.01	100	100	100	100	100	100	0.39	0.05	1.13	5.45	0.03	0.01
Cabeza analizada			0.40	0.05	1.20	3.80	0.03	0.02												

Compo 4			LEY						DISTRIBUCIÓN						CONTENIDO					
	Peso (g)	Peso (%)	Pb (%)	Cu (%)	Zn (%)	Fe(%)	As (ppm)	Sb (ppm)	Pb	Cu	Zn	Fe	As	Sb	Pb	Cu	Zn	Fe	As	Sb
Primario Pb	55.5	5.6	4.63	0.20	2.46	31.80	0.27	0.14	69.81	27.77	10.12	37.20	55.74	84.64	0.257	0.011	0	2	0.015	0
Agotativo Pb	64.1	6.4	0.56	0.06	2.86	17.80	0.12	0.01	9.76	8.82	13.57	24.05	28.42	9.86	0.036	0.004	0	1	0.008	0
Primario Zn	75.2	7.5	0.25	0.06	12.36	5.58	0.04	0.01	5.03	12.04	68.87	8.85	11.50	5.50	0.018	0.005	1	0	0.003	0
Agotativo Zn	36.8	3.7	0.15	0.04	0.92	9.94	0.03	0.00	1.51	3.31	2.50	7.71	4.34	0.00	0.006	0.001	0	0	0.001	0
Colas	768.4	76.8	0.07	0.03	0.09	1.37	0.00	0.00	13.89	48.06	4.94	22.19	0.00	0.00	0.051	0.019	0	1	0.000	0
1000.00	100.00		0.37	0.04	1.35	4.74	0.03	0.01	100	100	100	100	100	100	0.37	0.04	1.35	4.74	0.03	0.01
Cabeza analizada			0.38	0.05	1.48	3.93	0.04	0.01												

Compo 5			LEY						DISTRIBUCIÓN						CONTENIDO					
	Peso (g)	Peso (%)	Pb (%)	Cu (%)	Zn (%)	Fe(%)	As (ppm)	Sb (ppm)	Pb	Cu	Zn	Fe	As	Sb	Pb	Cu	Zn	Fe	As	Sb
Primario Pb	185.1	18.5	1.79	0.09	3.32	11.50	0.14	0.04	83.73	44.74	38.69	78.32	86.84	96.04	0.331	0.016	0.615	2.129	0.025	0.007
Agotativo Pb	43.8	4.4	0.30	0.04	2.90	0.44	0.05	0.01	3.36	4.83	8.00	0.71	6.81	3.96	0.013	0.002	0.127	0.019	0.002	0.000
Primario Zn	70.8	7.1	0.18	0.05	11.02	3.49	0.03	0.00	3.25	9.40	49.11	9.09	6.35	0.00	0.013	0.003	0.780	0.247	0.002	0.000
Agotativo Zn	19.3	1.9	0.10	0.03	0.69	4.84	0.00	0.00	0.48	1.58	0.83	3.44	0.00	0.00	0.002	0.001	0.013	0.093	0.000	0.000
Colas	681.0	68.1	0.05	0.02	0.08	0.34	0.00	0.00	9.18	39.46	3.37	8.44	0.00	0.00	0.036	0.014	0.054	0.229	0.000	0.000
1000.00	100.00		0.39	0.04	1.59	2.72	0.03	0.01	100	100	100	100	100	100	0.39	0.04	1.59	2.72	0.03	0.01
Cabeza analizada			0.37	0.04	1.58	5.81	0.03	0.01												

## FLOTACIÓN PLOMO-ZINC CON REMOCIÓN FÍSICOQUÍMICA

COMP 1			LEY						DISTRIBUCIÓN						CONTENIDO						
	Peso (g)	Peso (%)	Pb (%)	Cu (%)	Zn (%)	Fe (%)	As (ppm)	Sb (ppm)	Pb	Cu	Zn	Fe	As	Sb	Pb	Cu	Zn	Fe	As	Sb	
	Primario C	19.20	1.32	0.33	0.04	0.53	3.10	0.022	0.017	1.69	1.79	1.57	1.68	1.52	1.78	0.01	0.00	0.01	0.06	0.00	0.00
Primario Pb	20.40	2.04	0.96	0.46	0.69	5.98	0.078	0.368	5.26	19.91	2.17	3.43	5.68	40.01	0.02	0.01	0.01	0.12	0.00	0.01	
Agotativo Pb	15.10	1.51	1.68	0.20	0.83	4.33	0.056	0.160	6.85	6.34	1.92	1.84	3.03	12.87	0.03	0.00	0.01	0.07	0.00	0.00	
Primario Zn	40.00	4.00	0.63	0.10	5.42	3.58	0.034	0.058	6.80	8.63	33.19	4.03	4.94	12.26	0.03	0.00	0.22	0.14	0.00	0.00	
Agotativo Zn	21.90	2.19	0.85	0.07	3.68	4.43	0.038	0.037	5.04	3.34	12.34	2.73	3.00	4.36	0.02	0.00	0.08	0.10	0.00	0.00	
Colas	883.40	88.34	0.31	0.03	0.36	3.47	0.026	0.006	74.36	59.99	48.82	86.29	81.83	28.72	0.28	0.03	0.32	3.07	0.02	0.01	
	1000.00	100.00	0.37	0.05	0.65	3.55	0.03	0.02	100	100	100	100	100	100	0.37	0.05	0.65	3.55	0.03	0.02	
		Cabeza analizada	0.39	0.06	0.68	3.55	0.03	0.02													

COMP 2			LEY						DISTRIBUCIÓN						CONTENIDO						
	Peso (g)	Peso (%)	Pb (%)	Cu (%)	Zn (%)	Fe (%)	As (ppm)	Sb (ppm)	Pb	Cu	Zn	Fe	As	Sb	Pb	Cu	Zn	Fe	As	Sb	
	Primario C	13.20	1.32	0.48	0.05	0.08	3.59	0.022	0.023	1.83	1.34	0.13	1.23	1.13	2.31	0.01	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00
Primario Pb	26.90	2.69	5.36	0.36	1.42	7.79	0.100	0.293	42.15	19.23	4.74	5.43	10.45	61.16	0.14	0.01	0.04	0.21	0.00	0.01	
Agotativo Pb	26.70	2.67	1.86	0.09	1.31	12.20	0.092	0.059	14.51	4.98	4.32	8.44	9.60	12.29	0.05	0.00	0.03	0.33	0.00	0.00	
Primario Zn	50.90	5.09	0.37	0.07	7.58	10.90	0.085	0.014	5.56	6.97	47.83	14.37	16.82	5.68	0.02	0.00	0.39	0.55	0.00	0.00	
Agotativo Zn	49.50	4.95	0.60	0.06	3.53	19.20	0.154	0.016	8.69	6.29	21.66	24.61	29.82	6.29	0.03	0.00	0.17	0.95	0.01	0.00	
Colas	832.80	83.28	0.11	0.04	0.21	2.13	0.010	0.002	27.25	61.19	21.32	45.93	32.17	12.26	0.09	0.03	0.17	1.77	0.01	0.00	
	1000.00	100.00	0.34	0.05	0.81	3.66	0.03	0.01	100	100	100	100	100	100	0.34	0.05	0.81	3.66	0.03	0.01	
		Cabeza analizada	0.35	0.05	0.85	5.37	0.03	0.01													

COMP 3			LEY						DISTRIBUCIÓN						CONTENIDO						
	Peso (g)	Peso (%)	Pb (%)	Cu (%)	Zn (%)	Fe (%)	As (ppm)	Sb (ppm)	Pb	Cu	Zn	Fe	As	Sb	Pb	Cu	Zn	Fe	As	Sb	
	Primario C	12.60	1.26	0.79	0.08	1.10	1.69	0.034	0.043	2.47	2.08	1.14	0.48	1.26	4.53	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00
Primario Pb	51.20	5.12	5.30	0.26	2.75	24.10	0.253	0.190	67.13	26.83	11.61	27.67	37.90	81.51	0.27	0.01	0.14	1.23	0.01	0.01	
Agotativo Pb	30.30	3.03	1.11	0.09	2.14	39.40	0.150	0.035	8.33	5.25	5.35	26.77	13.28	8.87	0.03	0.00	0.06	1.19	0.00	0.00	
Primario Zn	33.50	3.35	0.26	0.08	18.98	4.01	0.039	0.009	2.19	5.65	52.43	3.01	3.86	2.58	0.01	0.00	0.64	0.13	0.00	0.00	
Agotativo Zn	38.00	3.80	0.36	0.05	4.73	7.88	0.075	0.008	3.37	4.23	14.82	6.72	8.29	2.51	0.01	0.00	0.18	0.30	0.00	0.00	
Colas	834.40	83.44	0.08	0.03	0.21	1.89	0.015	0.000	16.51	55.96	14.65	35.36	35.40	0.00	0.07	0.03	0.18	1.58	0.01	0.00	
	1000.00	100.00	0.40	0.05	1.21	4.46	0.03	0.01	100	100	100	100	100	100	0.40	0.05	1.21	4.46	0.03	0.01	
		Cabeza analizada	0.40	0.05	1.20	3.80	0.03	0.02													

COMP 4			LEY						DISTRIBUCIÓN						CONTENIDO						
	Peso (g)	Peso (%)	Pb (%)	Cu (%)	Zn (%)	Fe (%)	As (ppm)	Sb (ppm)	Pb	Cu	Zn	Fe	As	Sb	Pb	Cu	Zn	Fe	As	Sb	
	Primario C	14.60	1.46	1.61	0.11	1.58	3.78	0.050	0.080	6.14	3.72	1.59	0.80	2.36	11.47	0.02	0.00	0.02	0.06	0.00	0.00
Primario Pb	93.90	9.39	2.87	0.14	2.78	51.80	0.193	0.084	70.71	30.48	17.96	70.24	58.51	78.03	0.27	0.01	0.26	4.86	0.02	0.01	
Agotativo Pb	39.00	3.90	0.34	0.05	2.52	13.50	0.101	0.007	3.52	4.07	6.74	7.60	12.71	2.54	0.01	0.00	0.10	0.53	0.00	0.00	
Primario Zn	63.00	6.30	0.18	0.06	14.98	3.93	0.031	0.004	3.01	8.18	64.87	3.58	6.30	2.55	0.01	0.00	0.94	0.25	0.00	0.00	
Agotativo Zn	28.20	2.82	0.19	0.04	1.07	7.21	0.042	0.003	1.37	2.35	2.08	2.94	3.87	0.92	0.01	0.00	0.03	0.20	0.00	0.00	
Colas	761.30	76.13	0.08	0.03	0.13	1.35	0.007	0.001	15.26	51.19	6.76	14.84	16.26	4.50	0.06	0.02	0.10	1.03	0.01	0.00	
	1000.00	100.00	0.38	0.04	1.45	6.92	0.03	0.01	100	100	100	100	100	100	0.38	0.04	1.45	6.92	0.03	0.01	
		Cabeza analizada	0.38	0.05	1.48	3.93	0.04	0.01													

COMP 5			LEY						DISTRIBUCIÓN						CONTENIDO						
	Peso (g)	Peso (%)	Pb (%)	Cu (%)	Zn (%)	Fe (%)	As (ppm)	Sb (ppm)	Pb	Cu	Zn	Fe	As	Sb	Pb	Cu	Zn	Fe	As	Sb	
	Primario C	16.60	1.66	1.70	0.40	9.60	5.43	0.174	0.263	7.77	18.09	9.90	4.55	8.28	65.15	0.03	0.01	0.16	0.09	0.00	0.00
Primario Pb	137.70	13.77	1.88	0.06	2.75	4.22	0.158	0.016	71.28	22.48	23.53	29.31	62.62	31.88	0.26	0.01	0.38	0.58	0.02	0.00	
Agotativo Pb	53.80	5.38	0.21	0.04	3.00	10.20	0.065	0.004	3.07	5.70	10.03	27.68	10.03	2.97	0.01	0.00	0.16	0.55	0.00	0.00	
Primario Zn	82.90	8.29	0.19	0.05	10.04	4.22	0.030	0.000	4.42	11.17	51.72	17.64	7.10	0.00	0.02	0.00	0.83	0.35	0.00	0.00	
Agotativo Zn	31.30	3.13	0.12	0.03	0.77	2.30	0.018	0.000	1.07	2.59	1.49	3.63	1.65	0.00	0.00	0.00	0.02	0.07	0.00	0.00	
Colas	677.70	67.77	0.07	0.02	0.08	0.50	0.005	0.000	12.39	39.98	3.34	17.19	10.32	0.00	0.04	0.01	0.05	0.34	0.00	0.00	
	1000.00	100.00	0.36	0.04	1.61	1.98	0.03	0.01	100	100	100	100	100	100	0.36	0.04	1.61	1.98	0.03	0.01	
		Cabeza analizada	0.37	0.04	1.58	5.81	0.03	0.01													



## FLOTACIÓN PLOMO-ZINC CON REMOCIÓN FÍSICA

COMPÓSITO 1			LEY				DISTRIBUCIÓN				CONTENIDO			
	Peso (g)	Peso (%)	Pb (%)	Cu (%)	Zn (%)	Fe (%)	Pb	Cu	Zn	Fe	Pb	Cu	Zn	Fe
Primario C	5.4	0.54	0.257	0.056	0.487	2.345	0.39	0.52	0.41	0.36	0.00	0.00	0.00	0.01
Primario Pb	34.80	3.50	3.02	0.35	0.92	5.39	29.54	20.59	5.06	5.31	0.11	0.01	0.03	0.19
Agotativo Pb	28.80	2.90	4.31	0.18	1.28	13.92	34.98	8.74	5.78	11.34	0.12	0.01	0.04	0.40
Primario Zn	104.50	10.51	0.62	0.08	5.04	12.56	18.18	14.68	82.86	37.14	0.06	0.01	0.53	1.32
Agotativo Zn	42.60	4.28	0.12	0.05	0.12	3.28	1.49	3.44	0.81	3.96	0.01	0.00	0.01	0.14
Colas	783.90	78.82	0.07	0.04	0.04	1.89	15.43	52.03	5.07	41.90	0.06	0.03	0.03	1.49
	994.60	100.00	0.36	0.06	0.64	3.55	100	100	100	100	0.36	0.06	0.64	3.55
	Cabeza analizada		0.39	0.06	0.68	3.55								

COMPÓSITO 3			LEY				DISTRIBUCIÓN				CONTENIDO			
	Peso (g)	Peso (%)	Pb (%)	Cu (%)	Zn (%)	Fe (%)	Pb	Cu	Zn	Fe	Pb	Cu	Zn	Fe
Primario C	2.9	0.29	0.28	0.05	0.545	2.463	0.22	0.24	0.15	0.19	0.00	0.00	0.00	0.01
Primario Pb	53.90	5.39	4.82	0.24	2.10	21.36	69.33	20.80	10.67	30.02	0.26	0.01	0.11	1.15
Agotativo Pb	64.20	6.42	0.63	0.07	3.00	16.93	10.86	7.38	18.11	28.34	0.04	0.00	0.19	1.09
Primario Zn	121.00	12.10	0.21	0.06	5.78	4.28	6.87	11.54	65.78	13.50	0.03	0.01	0.70	0.52
Agotativo Zn	52.30	5.23	0.08	0.04	0.14	2.08	1.13	3.52	0.67	2.84	0.00	0.00	0.01	0.11
Colas	705.70	70.57	0.06	0.05	0.07	1.36	11.58	56.51	4.62	25.10	0.04	0.04	0.05	0.96
	1000.00	99.71	0.37	0.06	1.06	3.83	100	100	100	100	0.37	0.06	1.06	3.83
	Cabeza analizada		0.40	0.05	1.20	3.80								

COMPÓSITO 5			LEY				DISTRIBUCIÓN				CONTENIDO			
	Peso (g)	Peso (%)	Pb (%)	Cu (%)	Zn (%)	Fe (%)	Pb	Cu	Zn	Fe	Pb	Cu	Zn	Fe
Primario C	2.5	0.25	2.824	0.159	3.246	2.74	1.71	1.26	0.55	0.16	0.01	0.00	0.01	0.01
Primario Pb	215.90	21.59	1.55	0.07	4.28	15.41	80.67	49.76	62.76	79.27	0.33	0.02	0.92	3.33
Agotativo Pb	64.90	6.49	0.27	0.03	3.24	3.42	4.27	6.04	14.27	5.28	0.02	0.00	0.21	0.22
Primario Zn	86.70	8.67	0.16	0.04	3.24	2.44	3.36	9.96	19.07	5.04	0.01	0.00	0.28	0.21
Agotativo Zn	33.00	3.30	0.10	0.03	0.40	1.53	0.77	2.74	0.90	1.21	0.00	0.00	0.01	0.05
Colas	597.00	59.70	0.06	0.02	0.06	0.64	9.21	30.24	2.45	9.05	0.04	0.01	0.04	0.38
	1000.00	99.75	0.41	0.03	1.47	4.20	100	100	100	100	0.41	0.03	1.47	4.20
	Cabeza analizada		0.37	0.04	1.58	5.81								

## APÉNDICE III. MÉTODO DE REMOCIÓN FÍSICA DE MATERIA CARBONOSA

El método de remoción física de materia carbonosa de la celda de flotación se lleva a cabo aprovechando las propiedades físicas tales como hidrofobicidad de la materia carbonosa y adhesión.

1. La pulpa entra a la celda de flotación.
2. Encender el difusor-impulsor por 5 segundos y al termino del tiempo se apaga, mientras el impulsor este encendido se debe de inyectar aire por debajo de la celda. Esto origina que las partículas de materia carbonosa se adhieran a burbujas de aire y ascienda hasta la superficie quedando atrapadas en la interfase agua-aire con ayuda de la tensión superficial.
3. Estando la materia carbonosa en la superficie del agua, esperamos 3 segundos para dar oportunidad de que las partículas más densas precipiten, y al no tener turbulencia, se toma una superficie lisa (plástico o acrílico) y se pone en contacto con la superficie del agua en el cual la materia carbonosa se adhiere al igual que una pequeña capa de agua.
4. Removemos la materia carbonosa y la capa de agua con una goma el cual arrastrará la materia carbonosa.
5. Se repite este proceso en diferentes ocasiones hasta que poco a poco se vea reducida la materia carbonosa que asciende.

## APÉNDICE IV. ESTADÍSTICA

### Molienda

Compósito	Contenido de minerales				suma
	Cuarzo	Ortoclasa	Calcita	Sericita	
1	15	40	21.14	10	86.14
2	17.5	36.25	19.15	12.5	85.40
3	20	32.5	16.91	15	84.41
4	22.5	28.75	13.93	17.5	82.68
5	25	25	12.18	20	82.185

Compósito	Valores normalizados				suma
	Cuarzo	Ortoclasa	Calcita	Sericita	
1	17.412	46.43387816	24.54494799	11.60846954	100
2	20.49120342	42.44606423	22.42615848	14.63657387	100
3	23.69387513	38.50254709	20.03317143	17.77040635	100
4	27.21335269	34.77261732	16.84808902	21.16594098	100
5	30.41917625	30.41917625	14.8263065	24.335341	100

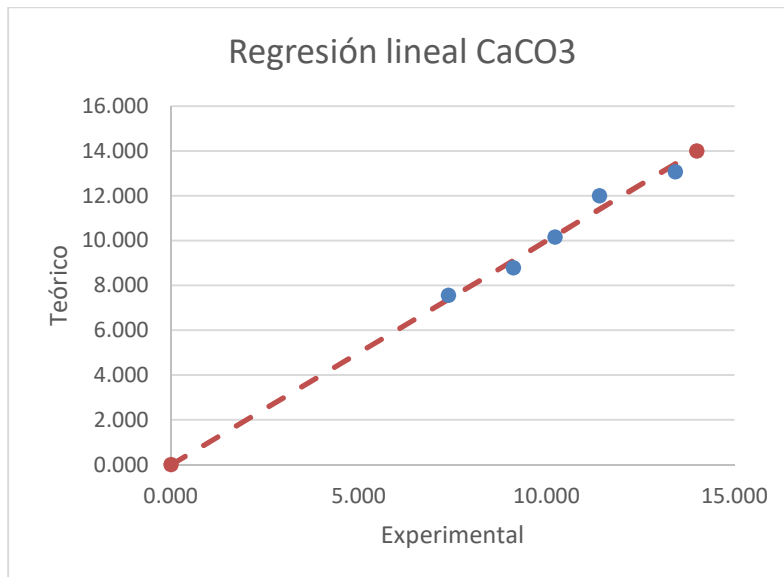
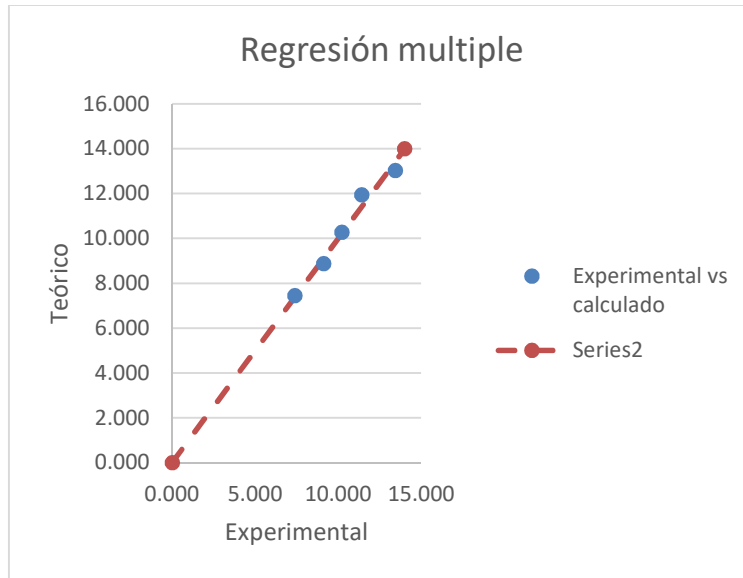
Compósito	P80 (125 μm)				suma
	Tiempo de molienda	Tectosilicatos	Carbonatos	Filosilicatos	
1	7.39	63.84658247	24.54494799	11.60846954	100
2	9.12	62.93726764	22.42615848	14.63657387	100
3	10.22	62.19642222	20.03317143	17.77040635	100
4	11.41	61.98597	16.84808902	21.16594098	100
5	13.43	60.8383525	14.8263065	24.335341	100

Compósito	Tiempo de molienda	Carbonatos	R tecto/filo
1	7.39	24.54494799	5.5
2	9.12	22.42615848	4.3
3	10.22	20.03317143	3.5
4	11.41	16.84808902	2.928571429
5	13.43	14.8263065	2.5

Resumen	
<b>Estadísticas de la regresión</b>	
<b>Coefficiente de correlación múltiple</b>	0.98768 9496
<b>Coefficiente de determinación R<sup>2</sup></b>	0.97553 0541
<b>R<sup>2</sup> ajustado</b>	0.95106 1082
<b>Error típico</b>	0.50561 2197
<b>Observaciones</b>	5

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
<b>Regresión</b>	2	20.38363 261	10.1918163 1	39.86 72704 9	0.0244 69459
<b>Residuos</b>	2	0.511287 388	0.25564369 4		
<b>Total</b>	4	20.89492			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
<b>Intercepción</b>	20.7761 9819	2.196269 528	9.45976708 3	0.010 99089 1	11.326 41311 7	30.22 59832 1	11.32 64131 1	30.225 98327
<b>Variable X 1</b>	- 0.45818 5656	0.267174 518	- 1.71493022 4	0.228 49338	- 1.6077 44826	0.691 37351 4	- 1.607 74482 6	0.6913 73514
<b>Variable X 2</b>	- 0.37898 4495	0.890268 786	- 0.42569671 2	0.711 76229 6	- 4.2095 01919	3.451 53292 9	- 4.209 50191 9	3.4515 32929



Compósito	tiempo de molienda (Y)	% CaCO3 (X)	Media X'	Media Y'	X-X'	Y-Y'	(X-X')*(Y-Y')	Cov (XY)	
1	7.39	21.144	16.66	10.31	4.48	-	-13.10	-6.61	Relación inversa entre variables
2	9.12	19.1525			2.49	-	-2.97		
3	10.22	16.91			0.25	-	-0.02		
4	11.41	13.93			-	-	-3.00		
5	13.43	12.185			-	-	-13.96		
							-33.05		

## Flotación

## MODELO MATEMÁTICO SR PARA PLOMO

Compósito	Recuperación Pb (SP)	Alteración	Corg
1	14.49	25	0.34
2	50.74	37.5	0.27
3	64.43	50	0.19
4	79.57	62.5	0.12
5	87.09	75	0.04

Compósito	Recuperación (Y)	Coef. Alt (X)	Media X'	Media Y'	X-X'	Y-Y'	(X-X')*(Y-Y')	Cov (XY)	
1	14.49	25	50.00	59.26	-25.00	-44.77	1119.29	435.08	Relación directa entre variables
2	50.74	37.5			-12.50	-8.53	106.58		
3	64.43	50			0.00	5.16	0.00		
4	79.57	62.5			12.50	20.30	253.80		
5	87.09	75			25.00	27.83	695.74		
							2175.41		

Compósito	Recuperación (Y)	%Corg	Media X'	Media Y'	X-X'	Y-Y'	(X-X')*(Y-Y')	Cov (XY)	
1	14.49	0.34	0.19	59.26	0.15	-44.77	-6.63	-2.60	Relación inversa entre variables
2	50.74	0.27			0.08	-8.53	-0.67		
3	64.43	0.19			0.00	5.16	-0.01		
4	79.57	0.12			-0.07	20.30	-1.46		
5	87.09	0.04			-0.15	27.83	-4.23		
							-12.99		



Compósito	Recuperación Pb SP (W)	Coef. Alt (X)	%Corg (Y)
1	14.49	25	0.34
2	50.74	37.5	0.27
3	64.43	50	0.19
4	79.57	62.5	0.12
5	87.09	75	0.04
media aritm	59.26	50.00	0.19
varianza	658.119463	312.5	0.011256

W-W'	X-X'	Y-Y'
-44.77	-25.00	0.15
-8.53	-12.50	0.08
5.16	0.00	0.00
20.30	12.50	-0.07
27.83	25.00	-0.15

Productos	Productos	Productos
W * X	W*Y	X*Y
1119.287	-6.626	-3.700
106.584	-0.665	-0.975
0.000	-0.010	0.000
253.798	-1.462	-0.900
695.741	-4.230	-3.800
2175.409208	-12.99356993	-9.375
435.082	-2.599	-1.875

**Matriz de covarianzas**

	Recuperación Pb SP(W)	Coef. Alt (X)	%Corg (Z)
Recuperación Pb SP(W)	658.119463	435.082	-2.599
Coef. Alt (X)	435.082	312.5	-1.875
%Corg (Z)	-2.599	-1.875	0.011256

**Matriz de correlaciones**

	Recuperación Pb SP (W)	Coef. Alt. (X)	Corg (Z)
Recuperación Pb SP(W)	1		
Coef. Alt. (X)	0.959386449	1	
Corg (Z)	-0.954803658	-0.99973344	1

**Resumen**

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.9775211 01
Coeficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.9555475 02
R <sup>2</sup> ajustado	0.9110950 05

	8.5520544
Error típico	24
Observaciones	5

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	3144.3220	1572.161023	21.495	0.044452
Residuos	2	146.27526	73.13763486	92375	498
Total	4	3290.5973	15		

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	976.06868	768.28679	-1.270448344	0.3317	4281.739	2329.6	4281.73	2329.60
Variable X 1	13.169326	9.3708041	1.405357105	0.2951	27.14998	53.488	27.1499	53.4886
Variable X 2	1962.8440	1561.3843	1.257117771	0.3356	4755.250	8680.9	4755.25	8680.93

MODELO MATEMÁTICO RFQ PARA PLOMO

Compósito	Recuperación Pb (RFQ)	Alteración	Corg
1	12.11	25	0.34
2	56.66	37.5	0.27
3	75.46	50	0.19
4	74.23	62.5	0.12
5	74.35	75	0.04

Compósito	Recuperación Pb (RFQ)	Coef. Alt (X)	Media X'	Media Y'	X-X'	Y-Y'	(X-X')*(Y-Y')	Cov (XY)	
1	12.11	25	50.00	58.56	-25.00	-46.45	1161.23	355.09	Relación directa entre variables
2	56.66	37.5			-12.50	-1.90	23.76		
3	75.46	50			0.00	16.90	0.00		
4	74.23	62.5			12.50	15.66	195.80		
5	74.35	75			25.00	15.79	394.66		
							1775.46		

Compósito	Recuperación Pb (RFQ)	‰Corg	Media X'	Media Y'	X-X'	Y-Y'	(X-X')*(Y-Y')	Cov (XY)	
1	12.11	0.34	0.19	58.56	0.15	-46.45	-6.87	-2.12	Relación inversa entre variables
2	56.66	0.27			0.08	-1.90	-0.15		
3	75.46	0.19			0.00	16.90	-0.03		
4	74.23	0.12			-0.07	15.66	-1.13		
5	74.35	0.04			-0.15	15.79	-2.40		
								-10.58	

Compósito	Recuperación Pb (RFQ)	Coef. Alt (X)	‰Corg (Y)
1	12.11	25	0.34
2	56.66	37.5	0.27
3	75.46	50	0.19
4	74.23	62.5	0.12
5	74.35	75	0.04
media aritm	58.56	50.00	0.19
varianza	588.263905	312.5	0.011256

W-W'	X-X'	Y-Y'
-46.45	-25.00	0.15
-1.90	-12.50	0.08
16.90	0.00	0.00
15.66	12.50	-0.07
15.79	25.00	-0.15

Productos

W * X	W * Y	X * Y
1161.229	-6.874	-3.700
23.765	-0.148	-0.975
0.000	-0.034	0.000
195.802	-1.128	-0.900
394.662	-2.400	-3.800
Suma	1775.458101	-10.5839337
	355.092	-2.117

**Matriz de covarianzas**

	Recuperación Pb RFQ(w)	Coef. Alt (X)	‰Corg (Z)
Recuperación Pb RFQ(w)	588.263905	355.092	-2.117
Coef. Alt (X)	355.092	312.5	-1.875
‰Corg (Z)	-2.117	-1.875	0.011256

**Matriz de correlaciones**

	Recuperación Pb RFQ(w)	Coef. Alt (X)	Corg (Z)
Recuperación Pb RFQ(w)	1		
Coef. Alt (X)	0.828188722	1	
Corg (Z)	-0.82261943	-0.99973344	1

## MODELO MATEMÁTICO RF PARA PLOMO

Compósito	Recuperación (Y)	Alteración	Corg
1	64.51	25	0.34
2	73.19	37.5	0.27
3	80.20	50	0.19
4	83.77	62.5	0.12
5	84.94	75	0.04

Compósito	Recuperación (Y)	Coef. Alt (X)	Media X'	Media Y'	X-X'	Y-Y'	(X-X')*(Y-Y')	Cov (XY)	Relación directa entre variables
1	64.51	25	50.00	77.32	-25.00	-12.81	320.31	128.61	
2	73.19	37.5			-12.50	-4.13	51.64		
3	80.20	50			0.00	2.87	0.00		
4	83.77	62.5			12.50	6.45	80.62		
5	84.94	75			25.00	7.62	190.51		
								643.07	

Compósito	Recuperación (Y)	%Corg	Media X'	Media Y'	X-X'	Y-Y'	(X-X')*(Y-Y')	Cov (XY)	Relación inversa entre variables
1	64.51	0.34	0.19	77.32	0.15	-12.81	-1.90	-0.77	
2	73.19	0.27			0.08	-4.13	-0.32		
3	80.20	0.19			0.00	2.87	-0.01		
4	83.77	0.12			-0.07	6.45	-0.46		
5	84.94	0.04			-0.15	7.62	-1.16		
								-3.85	

Compósito	Recuperación (Y)	Coef. Alt (X)	%Corg (Y)
1	64.51	25	0.34
2	73.19	37.5	0.27
3	80.20	50	0.19
4	83.77	62.5	0.12
5	84.94	75	0.04
media aritm	77.32	50.00	0.19
varianza	57.8290054	312.5	0.011256

W-W'	X-X'	Y-Y'
-12.81	-25.00	0.15
-4.13	-12.50	0.08
2.87	0.00	0.00
6.45	12.50	-0.07
7.62	25.00	-0.15

Productos	W*X	W*Y	X*Y
	320.307	-1.896	-3.700
	51.640	-0.322	-0.975
	0.000	-0.006	0.000
	80.621	-0.464	-0.900
	190.507	-1.158	-3.800
Suma	643.0743494	-3.846854	-9.375
	128.615	-0.769	-1.875

**Matriz de covarianzas**

	Recuperación Pb SP(w)	Coef. Alt (X)	%Corg (Z)
Recuperación Pb RF(w)	57.8290054	128.615	-0.769
Coef. Alt (X)	128.615	312.5	-1.875
%Corg (Z)	-0.769	-1.875	0.011256

**Matriz de correlaciones**

	Recuperación Pb SP(w)	Coef. Alt. (X)	Corg (Z)
Recuperación Pb RF(w)	1		
Coef. Alt. (X)	0.956738631	1	
Corg (Z)	-0.95360995	-0.999733	1

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.964800
Coeficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.930840
R <sup>2</sup> ajustado	0.861681
Error típico	3.162048
Observaciones	5

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	Valor F	Valor crítico de F
Regresión	2	269.1479	134.573964	13.45	0.06915
Residuos	2	19.99709	9.99854919		
Total	4	289.1450			

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Prueba bilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	133.368206	284.067406	-0.46949493	0.68492583	1355.61161	1088.87519	1355.61161	1088.87519
Variable X 1	2.73002549	3.46477389	0.78793756	0.51328909	12.1776933	17.6377443	12.1776933	17.6377443

	386.4096	577.3083		0.572	2097.54	2870.3	2097.5	2870.3
Variable X 2	51	86	0.6693297	20649	785	6715	4785	6715

---