



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA AMBIENTAL – SUSTANCIAS Y RESIDUOS PELIGROSOS

**SIMULACIÓN ACELERADA DEL INTEMPERISMO DE JALES DE UNA
PLANTA DE BENEFICIO PARA LA ESTIMACIÓN DE DRENAJE ÁCIDO**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ING. JOSÉ LUIS SÁNCHEZ GALARZA

TUTOR PRINCIPAL

DR. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ
PROFESOR DE TIEMPO COMPLETO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

COMITÉ TUTOR

DRA. GABRIELA MANTILLA MORALES, INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL
AGUA
M.A.I. LANDY IRENE RAMÍREZ BURGOS, FACULTAD DE QUÍMICA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., ENERO DE 2017

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M.A.I. Landy Irene Ramírez Burgos

Secretario: M. en C. Rolando Salvador García Gómez

Vocal: Dr. Francisco Martín Romero

1 er. Suplente: Dra. Gabriela Mantilla Morales

2 do. Suplente: Dr. Enrique César Valdez

Lugares donde se realizó la tesis:

División de Ingeniería Civil y Geomática, Facultad de Ingeniería, UNAM

Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Facultad de Ingeniería, UNAM

Laboratorio del Departamento de Ingeniería Minera, Industrial y TIC de la Universidad Politécnica de Catalunya.

Laboratorio del Departamento de Centros Científicos y Tecnológicos de la Universidad de Barcelona

TUTOR DE TESIS:

Dr. Enrique César Valdez

FIRMA

Agradecimientos

A Dios porque me permitió llegar hasta aquí.

A mi madre, Yolanda Galarza Pichardo, con mi admiración y agradecimiento por su ejemplo y por llevarme de la mano en cada paso; sin ella mi existencia, y mi esencia no hubieran sido posibles.

A mi tía, Elvia Galarza Pichardo, mi segunda madre, por todo su apoyo y dedicación a mi formación profesional, y la confianza en mí, alentándome para salir adelante y hacerme sentir firme y confiado.

A mi padre, José Luis Sánchez Magaña, por su apoyo, compañía, cariño y comprensión.

A mi tía, Irma Galarza Pichardo, que si bien ya no está con nosotros, siempre ha sido y será principal impulso para la obtención de mis logros y que sus ideas y palabras persisten en mí.

A mi hermano, Cristian Eder Sánchez Galarza, por su valioso apoyo constante, su compañía, comprensión y fortaleza.

A mi familia que me ha apoyado incondicionalmente y por los valores brindados, así como la motivación, la unión y el sacrificio que han tenido para ver en el presente trabajo un resultado de lo que podemos lograr. Mis más sinceros agradecimientos.

Esta tesis no hubiera sido posible sin el apoyo incondicional del Dr. Enrique César Valdez, tutor y director de la misma, con mi más profunda admiración por su trayectoria profesional y por el gran ser humano que es. Mi más sincero agradecimiento por el tiempo, apoyo, consejos, ideas y formación brindada.

A la Dra. Gabriela Mantilla Morales, y a la M.A.I. Landy Irene Ramírez Burgos, integrantes del Comité Tutor, por guiar este trabajo de forma constante y paciente.

Al Dr. Francisco Martín Romero y al M. en C. Rolando Salvador García Gómez por sus consejos en la integración final de la presente tesis.

A Roxana Fabiola Martínez Navarro, por su amistad, consejos y el apoyo brindado en la etapa experimental del presente trabajo.

A mis amigos Mayanin Ramírez Tenhjai y Oscar Arroyo García por su amistad y apoyo incondicional en toda esta etapa.

A mis amigos y compañeros que de forma directa e indirecta siempre me han apoyado y hemos podido formar un gran equipo.

A la empresa Compañía Minera y Beneficiadora Purísima, S. de R.L., así como al Lic. Homero Vega y al Ing. Roberto Ramírez Martínez por todo el apoyo y las facilidades proporcionadas desinteresadamente para la obtención de las muestras y el análisis en laboratorio de las mismas para la realización del estudio.

A la Dra. María Pura Alfonso Abella por sus consejos, atención, tiempo y la oportunidad de realizar una estancia académica en la Universidad Politécnica de Cataluña, España.

A Natasha Carime Villaseñor Hernández por su amistad, el apoyo y las facilidades brindadas para la realización de las pruebas en laboratorio.

A Dulce María Cisneros Peralta y a Juanita Elizabeth Sotelo Morales por su amistad y apoyo en la etapa experimental del presente estudio.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por su apoyo decidido, generoso y desinteresado durante mis estudios de maestría.

Al posgrado de la Facultad de Ingeniería que me permitió ampliar mis conocimientos.

Por último, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo otorgado por medio de la beca nacional y beca mixta para la realización de estos estudios.

José Luis Sánchez Galarza.

Enero de 2017

ÍNDICE

1. Introducción	16
1.1 Justificación.....	16
1.2 Objetivos.....	18
1.2.1 General.....	18
1.2.2 Particulares.....	18
1.3 Alcances	19
1.4 Metas	19
2. Antecedentes	20
2.1 Minería metálica y no metálica	20
2.2 La minería en México	20
2.3 Yacimientos minerales en México.....	22
Oro y plata en kilogramos. *Cifras preliminares.	23
2.4 Residuos provenientes de la minería.....	23
3. Zona de estudio	25
3.1 Ubicación.....	25
3.2 Características generales	25
3.3 Proceso de beneficio	26
4. Marco teórico	33
4.1 Definiciones.....	33
4.1.1 Residuo	33
4.1.2 Residuo peligroso	33
4.1.3 Jal minero.....	33
4.1.4 Presa de jales.....	33
4.1.5 Drenaje ácido de minas	34
4.2 Participación de la minería en la generación de residuos peligrosos (RP)	34
4.3 Manejo de jales mineros en México.....	35
4.3.1 Características generales de los jales mineros.....	35
4.3.2 Importancia del manejo de los jales mineros	35
4.3.3 Alteración de los jales a diferentes ambientes.....	36
4.3.4. Consecuencias de la alteración de los jales	36

4.4. Principales procesos que ocurren en la oxidación de los residuos mineros	37
4.4.1 Oxidación	37
4.4.2 Neutralización.....	39
4.5 Drenaje ácido de mina	39
4.5.1 Fuentes de generación de drenaje ácido.....	40
4.5.2 Minerales sulfurosos que producen acidez al oxidarse	40
4.6 Normativa	42
4.7 Estudios geológicos.....	43
4.8 Modelado geoquímico	46
4.8.1 Pruebas estáticas	46
4.8.2 Pruebas cinéticas.....	52
5. Metodología del estudio	57
5.1 Recopilación de la información	58
5.2 Selección del sitio de muestreo	58
5.3 Diseño de muestreo.....	59
5.3.1 Campaña de muestreo	63
5.4 Montaje de las técnicas en laboratorio	69
5.4.1 Prueba de pH en pasta	69
5.4.2 Montaje de la prueba estática basada en la prueba modificada balance ácido-base:	73
5.4.3 Montaje de la prueba cinética basado en el modelo de celdas de humedad:	74
5.5 Análisis en laboratorio	76
5.5.1 Prueba estática	76
5.5.2 Análisis mineralógico.....	93
5.5.3 Prueba cinética.....	95
5.5.4 Análisis químico	98
5.5.5 Determinación de metales pesados.....	104
6. Resultados y discusión	105
6.1 Resultados de la prueba estática	105
6.2 Análisis de los resultados de la prueba estática	106
6.3 Análisis de los resultados de la prueba de análisis mineralógico	106
6.4 Resultados de la Microscopía Electrónica de Barrido.....	107
6.5 Resultados de la prueba cinética	107

6.6	Análisis de resultados de la prueba cinética.....	111
6.7	Resultados del contenido de metales pesados.....	112
6.8	Análisis de resultados del contenido de metales pesados.....	112
7.	Propuestas para la estimación de drenaje ácido	113
7.1	Propuesta de una metodología de muestreo.....	113
7.2	Propuesta de una metodología de análisis de laboratorio	113
7.3	Recomendaciones	114
8.	Conclusiones	115
9.	Referencias.....	116
10.	Anexos.....	119
10.1	Anexo A (Diseño de muestreo en México)	119
10.2	Anexo B (Diseño de muestreo en Canadá).....	122
10.3	Anexo C (Diseño de muestreo en Barcelona, España).....	124
10.4	Anexo D (Resultados del análisis mineralógico).....	126
10.5	Anexo E (Resultados del análisis químico)	129
10.6	Anexo F (Resultados de la prueba cinética).....	143

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Principales proyectos para la explotación de plata en México	21
Tabla 2.2. Producción minera según principales estados productores durante febrero de 2015 en toneladas (INEGI, 2015).	22
Tabla 3.1. Temperaturas máximas, mínimas, medias y precipitación de Zimapán, periodo de 1950-2010 (SMN, 2015).	25
Tabla 4.1. Etapas de la generación del drenaje ácido (Gobierno de Chile, 2002).	40
Tabla 4.2. Resistencia a la meteorización de algunos sulfuros (Gobierno de Chile, 2002).	42
Tabla 4.3. Resumen de algunas Pruebas Estáticas (Lapakko 1993; US EPA, 1994; Maest et al, 2005).	47
Tabla 4.4. Resumen de algunas Pruebas Cinéticas (Lapakko 1993; US EPA, 1994; Maest et al, 2005).	53
Tabla 5.1. Hoja de registro de muestreo de jales mineros de la Compañía Minera y Beneficiadora Purísima S. de R.L.	64
Tabla 5.2. Resultados de la prueba de pH en pasta para la muestra JLP12.	72
Tabla 5.3. Reacción de los carbonatos en cada una de las muestras.	78
Tabla 5.4. Cálculo del volumen de HCl para determinar el potencial de neutralización (NOM-141-SEMARNAT-2003).	78
Tabla 5.5. Volumen de HCl 1.0 N agregado por muestra y registro de pH al final de la agitación. Va (volumen de HCl adicionado en la mezcla 2), Vb (Volumen de HCl adicionado en la mezcla 3) y Vc (Volumen de HCl adicionado en la mezcla 4).	79
Tabla 5.6. Volumen añadido de NaOH 0.1 N hasta alcanzar un pH de 8.3.	80
Tabla 5.7. Volumen final de HCl utilizado en la prueba para cada muestra	81
Tabla 5.8. Potencial de neutralización de las muestras de jales.	81
Tabla 5.9. Registro del peso de las muestras para la determinación de azufre total	83
Tabla 5.10. Registro del peso de cada crisol por muestra y el peso del crisol con el precipitado.	88
Tabla 5.11. Registro del peso del precipitado en las muestras, el peso del precipitado en la prueba en blanco y el contenido de azufre total en porcentaje	88
Tabla 5.12. Soluciones de sulfato estándar de H ₂ SO ₄	89
Tabla 5.13. Azufre en forma de sulfatos de cada una de las muestras.	92
Tabla 5.14. Azufre en forma de sulfatos de cada una de las muestras.	93
Tabla 6.1. Estimación de la generación de drenaje ácido de acuerdo al criterio establecido en la NOM-157-SEMARNAT-2009 para cada una de las muestras. DAM: Drenaje Ácido de Mina.	105
Tabla 6.2. Resultados de pH, conductividad eléctrica, temperatura, fecha y hora de la aplicación del lavado, registro de volúmenes de entrada y salida y la alcalinidad del lixiviado de la muestra JLP12, la cual se extrajo a una profundidad de 30cm de la presa número 5.	108
Tabla 6.3. Resultados de la determinación de metales en las muestras de residuos mineros	112
Tabla 10.1. Muestreo exploratorio.	121
Tabla 10.2. Frecuencia sugerida de muestreo inicial basado en el tonelaje durante el muestreo sin información previa (adaptado de BCAMDTF, 1989).	124

Tabla 10.3. Resultados de pH, conductividad eléctrica, temperatura, fecha y hora de la aplicación del lavado, registro de volúmenes de entrada y salida y la alcalinidad del lixiviado de la muestra JLP1, la cual se extrajo a una profundidad de 30cm de la presa número 4	143
Tabla 10.4. Resultados de pH, conductividad eléctrica, temperatura, fecha y hora de la aplicación del lavado, registro de volúmenes de entrada y salida y la alcalinidad del lixiviado de la muestra JLP2, la cual se extrajo a una profundidad de 80cm de la presa número 4	145
Tabla 10.5. Resultados de pH, conductividad eléctrica, temperatura, fecha y hora de la aplicación del lavado, registro de volúmenes de entrada y salida y la alcalinidad del lixiviado de la muestra JLP3, la cual se extrajo a una profundidad de 130cm de la presa número 4	147
Tabla 10.6. Resultados de pH, conductividad eléctrica, temperatura, fecha y hora de la aplicación del lavado, registro de volúmenes de entrada y salida y la alcalinidad del lixiviado de la muestra JLP4, la cual se extrajo a una profundidad de 180cm de la presa número 4	149
Tabla 10.7. Resultados de pH, conductividad eléctrica, temperatura, fecha y hora de la aplicación del lavado, registro de volúmenes de entrada y salida y la alcalinidad del lixiviado de la muestra JLP5, la cual se extrajo a una profundidad de 390cm de la presa número 4	151
Tabla 10.8. Resultados de pH, conductividad eléctrica, temperatura, fecha y hora de la aplicación del lavado, registro de volúmenes de entrada y salida y la alcalinidad del lixiviado de la muestra JLP6, la cual se extrajo a una profundidad de 300cm de la presa número 4	153
Tabla 10.9. Resultados de pH, conductividad eléctrica, temperatura, fecha y hora de la aplicación del lavado, registro de volúmenes de entrada y salida y la alcalinidad del lixiviado de la muestra JLP7, la cual se extrajo a una profundidad de 110cm de la presa número 2	155
Tabla 10.10. Resultados de pH, conductividad eléctrica, temperatura, fecha y hora de la aplicación del lavado, registro de volúmenes de entrada y salida y la alcalinidad del lixiviado de la muestra JLP8 la cual se extrajo a una profundidad de 120cm de la presa número 2	157
Tabla 10.11. Resultados de pH, conductividad eléctrica, temperatura, fecha y hora de la aplicación del lavado, registro de volúmenes de entrada y salida y la alcalinidad del lixiviado de la muestra JLP9, la cual se extrajo a una profundidad de 30 cm de la presa número 1	159
Tabla 10.12. Resultados de pH, conductividad eléctrica, temperatura, fecha y hora de la aplicación del lavado, registro de volúmenes de entrada y salida y la alcalinidad del lixiviado de la muestra JLP10, la cual se extrajo a una profundidad de 55cm de la presa número 1	161
Tabla 10.13. Resultados de pH, conductividad eléctrica, temperatura, fecha y hora de la aplicación del lavado, registro de volúmenes de entrada y salida y la alcalinidad del lixiviado de la muestra JLP11, la cual se extrajo a una profundidad de 30cm en un sitio alejado de las presas de jales, siendo la muestra testigo.....	163
Tabla 10.14. Resultados de pH, conductividad eléctrica, temperatura, fecha y hora de la aplicación del lavado, registro de volúmenes de entrada y salida y la alcalinidad del lixiviado de la muestra JLP12, la cual se extrajo a una profundidad de 30 cm de la presa número 5	165
Tabla 10.15. Resultados de pH, conductividad eléctrica, temperatura, fecha y hora de la aplicación del lavado, registro de volúmenes de entrada y salida y la alcalinidad del lixiviado de la muestra JLP13, la cual se extrajo a una profundidad de 50cm de la presa número 5	167
Tabla 10.16. Resultados de pH, conductividad eléctrica, temperatura, fecha y hora de la aplicación del lavado, registro de volúmenes de entrada y salida y la alcalinidad del lixiviado de la muestra JLP14, la cual es duplicado de la muestra JLP7, que no se incluyó en el sistema de humidificado	169

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Principales proyectos y cambios en la producción minera de plata en México (CAMIMEX, 2015).....	21
Figura 3.1. Gráfica de las temperaturas, máximas, medias, mínimas y precipitación de la región de Zimapán, Estado de Hidalgo. Elaborada con datos del Sistema Meteorológico Nacional, (SMN).	26
Figura 3.2. Recepción de la roca que contiene el mineral de interés.	28
Figura 3.3. Trituración del material proveniente de la mina.....	29
Figura 3.4. Molienda por medio de un molino de bolas.....	30
Figura 3.5. Reactivos, sulfato de zinc (a), sulfato de cobre (b) y cianuro de sodio (c).....	30
Figura 3.6. Circuito de flotación.....	31
Figura 3.7. Disposición de los residuos mineros en las presas de jales. Donde a) disposición de residuos mineros en una presa de jales y b) presa de jales sin operar.	32
Figura 4.1. Generación de residuos peligrosos por región en México (SEMARNAT, 2012).....	34
Figura 4.2. Generación de residuos peligrosos por tipo de industria en México (SEMARNAT, 2012)...	35
Figura 4.3. Los principales efectos del drenaje ácido sobre los sistemas lóticos. (Citado por López, 2013, modificado de Gray, 1997).....	37
Figura 4.4. Dinámica de la generación de drenaje ácido en el medio ambiente (Gobierno de Chile, 2002).....	41
Figura 4.5. Parámetros a evaluar para la obtención del índice de drenaje ácido de roca. ASPY: arsenopirita; Qtz: cuarzo; Vc: roca volcánica, Py: pirita; Feox: Óxidos de hierro; Cal: calcita; Gl: galena; PAF: potencialmente generadores de ácido; NAF: no formadores de ácido; ANC: capacidad de neutralización de ácido (Parbhakar-Fox, 2011).	44
Figura 4.6. Diagrama de flujo de la metodología para la estimación de drenaje ácido en muestras de residuos mineros utilizada en la Universidad Politécnica de Cataluña, Manresa, España (Modificado de Parbhakar-Fox, 2011).....	45
Figura 4.7. Diagrama de flujo del procedimiento de la Prueba Modificada de Balance Ácido Base (Flores, 2013).....	49
Figura 4.8. Diagrama de flujo del procedimiento para determinación de azufre total de acuerdo a la NMX-B-400-1970 (Flores, 2013).....	50
Figura 4.9. Diagrama de flujo del procedimiento para la extracción de los sulfatos de acuerdo a la NMX-B-021-1982 (Flores, 2013).....	51
Figura 4.10. Diagrama de flujo del procedimiento de cuantificación de sulfatos por el método turbidimétrico EPA-9038 (Flores, 2013).....	52
Figura 4.11. Diagrama de las celdas de humedad.....	55
Figura 4.12. Diagrama del arreglo del sistema humidificado. Fuente: modificado de EPA, 2007.....	56
Figura 5.1. Diagrama de flujo de la metodología del estudio.	57
Figura 5.2. Localización de la empresa, oficinas, planta de beneficio y las presas de jales con las que cuenta (Google Earth, 2015).....	59
Figura 5.3. Polígono considerado en el bordo de la presa de jales para la toma de muestra localizado en plano satelital.	60
Figura 5.4. Polígono considerando la presa de jales número 2 completa para la toma de muestra localizado en el plano satelital.	61

Figura 5.5. Cuadrícula propuesta para la toma de muestras en el bordo de la presa de jales.....	62
Figura 5.6. Localización de los puntos de muestreo en mapa satelital de la zona sur de Zimapán, Hidalgo (Google Earth, 2015).....	65
Figura 5.7. Toma de la muestra JLP1, en la presa número 4 a una profundidad de 30 cm.	65
Figura 5.8. Sellado de recipientes con cinta adhesiva, que contienen a las muestras para evitar el contacto con el oxígeno hasta el análisis en laboratorio.....	66
Figura 5.9. Cubriendo con papel aluminio los recipientes que contienen a las muestras para evitar el contacto con la luz hasta su refrigeración.	66
Figura 5.10. Presa de jales número 5 de la Compañía Minera y Beneficiadora Purísima.	67
Figura 5.11. Perfil de los jales mineros depositados en la presa número 4 de la Compañía Minera y Beneficiadora Purísima.....	67
Figura 5.12. Toma de la muestra JLP11 (muestra testigo) en un sitio apartado de las presas de jales mediante un cavahoyos.....	68
Figura 5.13. Bordo de contención de la presa de jales número 1 de la Compañía Minera y Beneficiadora Purísima.....	68
Figura 5.14. Calibración del medidor de pH.....	70
Figura 5.15.Registro de peso de la muestra JLP12 para determinar la cantidad de agua destilada y desionizada a agregar.	70
Figura 5.16. Adición de la cantidad de agua destilada y desionizada a la muestra.	71
Figura 5.17. Primera medición (tiempo 0).	71
Figura 5.18. Mediciones consecutivas a un determinado tiempo.	72
Figura 5.19. Equipo utilizado para la medición de pH.	73
Figura 5.20. Secado de muestras a 35 °C en un horno de convección.	73
Figura 5.21. Tamizado de las muestras a malla 200 a un tamaño de partícula de 75 µm.	74
Figura 5.22. Fabricación de las celdas de humedad.Donde: a) corte de los tubos de acrílico, b) corte de las bases de las celdas, c) unión de la celda y d) colocación de la capa filtrante en las celdas.....	74
Figura 5.23. a) Conexiones, b) manguera para pecera, c) tanque de dióxido de carbono, d) armado del sistema de humidificado y e) bomba para pecera.	75
Figura 5.24. Ensayos con arena de playa y residuo minero para garantizar el funcionamiento de todo el sistema.	76
Figura 5.25.Preparación de soluciones para prueba estática. Donde: a) preparación de soluciones y b) finalización de soluciones.....	77
Figura 5.26. Medición cualitativa de carbonatos en las muestras. Donde: a) preparación de las muestras para la adición de ácido clorhídrico y b) adición de ácido clorhídrico a cada una de las muestras.	77
Figura 5.27. Agitación de mezclas por periodos de 2 y 22 horas.	78
Figura 5.28. Medición de pH después de la agitación y adición de HCl hasta la disminución de la acidez a un pH de 2.5.	79
Figura 5.29. Titulación con solución NaOH.....	80
Figura 5.30. Gráfica del potencial de neutralización en kg de CaCO ₃ /ton.	82
Figura 5.31. Pesado, colocación de la muestra en vasos de precipitados y adición de ácido nítrico. Donde: a) colocación de la muestra en vidrios de reloj y b) adición de ácido nítrico en las muestras...	83
Figura 5.32. Arena Berkshire utilizada para el blanco.	84

Figura 5.33. Adición de ácido perclórico, se llevan a humos las muestras en la campana de extracción. Donde: a) adición de ácido perclórico a las muestras y b) calentamiento de las muestras hasta llevarlas a humos.....	84
Figura 5.34. Adición de zinc y se llevan a calor suave las muestras. Donde: a) reactivo utilizado (zinc), b) calentamiento de las muestras hasta reducir el hierro y c) adición del zinc.....	85
Figura 5.35. En el sentido de las manecillas del reloj, se presenta el montaje del sistema de filtración, la filtración de las muestras y el papel filtro utilizado. Donde: a) montaje del sistema de filtración, b) procedimiento de filtración de las muestras y c) papel filtro utilizado.....	86
Figura 5.36. Muestra después del filtrado. Figura 5.37. Muestras al día siguiente del.....	86
Figura 5.38. Colocación de los crisoles de porcelana al horno, carbonizando el papel filtro y calcinando a 980°C. Donde: a) colocación de los crisoles de porcelana al horno, b) carbonización del papel filtro y c) muestras a una temperatura de 980°C.....	87
Figura 5.39. Retiro de los crisoles del horno, colocación en desecador y precipitado obtenido del blanco y cinco muestras. Donde: a) retiro de los crisoles del horno y b) colocación de los crisoles de porcelana en un desecador.....	87
Figura 5.40. Preparación de las soluciones para la curva de calibración.....	89
Figura 5.41. Curva de calibración.	89
Figura 5.42. Transferencia de las muestras a matraces Erlenmeyer.....	90
Figura 5.43. Agitación y calentar hasta ebullición cada muestra.....	90
Figura 5.44. Agitación y ebullición de cada muestra.	90
Figura 5.45. Adición de la solución acondicionadora y el periodo de agitación. Donde: a) adición de la solución acondicionadora y b) medición del periodo de agitación.	91
Figura 5.46. Adición de cloruro de bario (BaCl), agitación y medición de la turbidez. Donde: a) adición de cloruro de bario a cada muestra y b) registro de la turbidez.	91
Figura 5.47. Proceso de molienda de las 13 muestras.	93
Figura 5.48. Colocación de muestra en los recipientes de polietileno de alta densidad.....	94
Figura 5.49. Gráfica de resultados que entrega el programa del contenido mineral de la muestra JLP1, extraída a una profundidad de 30cm.....	94
Figura 5.50. Gráfica de pastel del contenido mineral de la muestra JLP1, extraída a una profundidad de 30cm.....	95
Figura 5.51. Medición del peso de las muestras y disposición en cada una de las celdas. Donde: a) registro del peso de las muestras y b) colocación de las muestras dentro de las celdas.	95
Figura 5.52. Sistema de celdas de humedad completo. Donde: a) conexión del sistema humidificado a las celdas y b) sistema de celdas de humedad completo.	96
Figura 5.53. Mediciones de pH, conductividad eléctrica y el recipiente con los lixiviados de los lavados semanales. Donde: a) obtención de lixiviados y b) registro de pH de cada muestra.	97
Figura 5.54. Determinación de Alcalinidad en lixiviados de prueba cinética.	98
Figura 5.55. Microscopio electrónico de barrido Hitachi TM-1000.....	98
Figura 5.56. a) Cinta conductora de carbón y b) porta muestra.	99
Figura 5.57. a) Colocación de la cinta conductora de carbón en el porta muestras, b) cinta conductora lista para sujetar la muestra.	99
Figura 5.58. a) Toma de una porción de la muestra, b) acercamiento del porta muestras para sujetar la porción de muestra a analizar.	100

Figura 5.59. Colocación del porta muestras en el microscopio electrónico de barrido.	100
Figura 5.60. Encendido del microscopio electrónico de barrido.	100
Figura 5.61. Análisis de la muestra con el apoyo de software.	101
Figura 5.62. Partículas de la muestra JLP6	101
Figura 5.63. Resultados del análisis.....	102
Figura 5.64. Fracción de una partícula de interés.....	102
Figura 5.65. Punto de interés a analizar.	103
Figura 5.66. Gráfica de resultados de una partícula de la muestra JLP6.....	103
Figura 6.1. Comparativa de los espectros que se obtuvieron como resultado del análisis de las muestras JLP3, JLP1, JLP7 y JLP11.	107
Figura 6.2. Gráfica de pH de la muestra JLP12.....	108
Figura 6.3. Gráfica de conductividad eléctrica de la muestra JLP12	109
Figura 6.4. Gráfica de alcalinidad de la muestra JLP12.....	109
Figura 6.5. Gráfica comparativa de pH de las muestras JLP1, JLP2, JLP3, JLP4, JLP5 y JLP6, respectivamente, extraídas de la presa de jales número 4.	110
Figura 6.6. Gráfica comparativa de conductividad eléctrica de las muestras JLP1, JLP2, JLP3, JLP4, JLP5 y JLP6, respectivamente, extraídas de la presa de jales número 4.	110
Figura 6.7. Gráfica comparativa de alcalinidad de las muestras JLP1, JLP2, JLP3, JLP4, JLP5 y JLP6, extraídas de la presa número 4.	111
Figura 10.1. Guía para el número de muestras. Fuente: Bruce Downing, M. Sc., P. Geo. “Toma y preparación de muestras”.	122
Figura 10.2. Gráfica de pastel del contenido mineral de la muestra llamada JLP1.....	126
Figura 10.3. Gráfica de pastel del contenido mineral de la muestra llamada JLP3.....	126
Figura 10.4. Gráfica de pastel del contenido mineral de la muestra llamada JLP5.....	127
Figura 10.5. Gráfica de pastel del contenido mineral de la muestra llamada JLP7.....	127
Figura 10.6. Gráfica de pastel del contenido mineral de la muestra llamada JLP8.....	127
Figura 10.7. Gráfica de pastel del contenido mineral de la muestra llamada JLP9.....	128
Figura 10.8. Gráfica de pastel del contenido mineral de la muestra llamada JLP11.....	128
Figura 10.9. Gráfica de pastel del contenido mineral de la muestra llamada JLP12.....	128
Figura 10.10. Gráfica de pastel del contenido mineral de la muestra llamada JLP2.....	129
Figura 10.11. Partículas de la muestra JLP1.....	129
Figura 10.12. Gráfica de resultados de una partícula de la muestra JLP1.	130
Figura 10.13. Partículas de la muestra JLP2.....	130
Figura 10.14. Gráfica de resultados de una partícula de la muestra JLP2.	131
Figura 10.15. Partículas de la muestra JLP3.....	131
Figura 10.16. Gráfica de resultados de una partícula de la muestra JLP3.	132
Figura 10.17. Partículas de la muestra JLP4.....	132
Figura 10.18. Gráfica de resultados de una partícula de la muestra JLP4.	133
Figura 10.19. Partículas de la muestra JLP5.....	133
Figura 10.20. Gráfica de resultados de una partícula de la muestra JLP5.	134
Figura 10.21. Partículas de la muestra JLP6.....	134
Figura 10.22. Gráfica de resultados de una partícula de la muestra JLP6.	135

Figura 10.23. Partículas de la muestra JLP7.	135
Figura 10.24. Gráfica de resultados de una partícula de la muestra JLP7.	136
Figura 10.25. Partículas de la muestra JLP8.	136
Figura 10.26. Gráfica de resultados de una partícula de la muestra JLP8.	137
Figura 10.27. Partículas de la muestra JLP9.	137
Figura 10.28. Gráfica de resultados de una partícula de la muestra JLP9.	138
Figura 10.29. Partículas de la muestra JLP10.	138
Figura 10.30. Gráfica de resultados de una partícula de la muestra JLP10.	139
Figura 10.31. Partículas de la muestra JLP11.	139
Figura 10.32. Gráfica de resultados de una partícula de la muestra JLP11.	140
Figura 10.33. Partículas de la muestra JLP12.	140
Figura 10.34. Gráfica de resultados de una partícula de la muestra JLP12.	141
Figura 10.35. Partículas de la muestra JLP13.	141
Figura 10.36. Gráfica de resultados de una partícula de la muestra JLP13.	142
Figura 10.37. Gráfica de pH de la muestra JLP1.	143
Figura 10.38. Gráfica de conductividad eléctrica de la muestra JLP1.	144
Figura 10.39. Gráfica de alcalinidad de la muestra JLP1.	144
Figura 10.40. Gráfica de pH de la muestra JLP2.	145
Figura 10.41. Gráfica de conductividad eléctrica de la muestra JLP2.	146
Figura 10.42. Gráfica de alcalinidad de la muestra JLP2.	146
Figura 10.43. Gráfica de pH de la muestra JLP3.	147
Figura 10.44. Gráfica de conductividad eléctrica de la muestra JLP3.	148
Figura 10.45. Gráfica de alcalinidad de la muestra JLP3.	148
Figura 10.46. Gráfica de pH de la muestra JLP4.	149
Figura 10.47. Gráfica de conductividad eléctrica de la muestra JLP4.	150
Figura 10.48. Gráfica de alcalinidad de la muestra JLP4.	150
Figura 10.49. Gráfica de pH de la muestra JLP5.	151
Figura 10.50. Gráfica de conductividad eléctrica de la muestra JLP5.	152
Figura 10.51. Gráfica de alcalinidad de la muestra JLP5.	152
Figura 10.52. Gráfica de pH de la muestra JLP6.	153
Figura 10.53. Gráfica de conductividad eléctrica de la muestra JLP6.	154
Figura 10.54. Gráfica de alcalinidad de la muestra JLP6.	154
Figura 10.55. Gráfica de pH de la muestra JLP7.	155
Figura 10.56. Gráfica de conductividad eléctrica de la muestra JLP7.	156
Figura 10.57. Gráfica de alcalinidad de la muestra JLP7.	156
Figura 10.58. Gráfica de pH de la muestra JLP8.	157
Figura 10.59. Gráfica de conductividad eléctrica de la muestra JLP8.	158
Figura 10.60. Gráfica de alcalinidad de la muestra JLP8.	158
Figura 10.61. Gráfica de pH de la muestra JLP9.	159
Figura 10.62. Gráfica de conductividad eléctrica de la muestra JLP9.	160
Figura 10.63. Gráfica de alcalinidad de la muestra JLP9.	160
Figura 10.64. Gráfica de pH de la muestra JLP10.	161

Figura 10.65. Gráfica de conductividad eléctrica de la muestra JLP10.....	162
Figura 10.66. Gráfica de alcalinidad de la muestra JLP10.	162
Figura 10.67. Gráfica de pH de la muestra JLP11.	163
Figura 10.68. Gráfica de conductividad eléctrica de la muestra JLP11.....	164
Figura 10.69. Gráfica de alcalinidad de la muestra JLP11.	164
Figura 10.70. Gráfica de pH de la muestra JLP12.....	165
Figura 10.71. Gráfica de conductividad eléctrica de la muestra JLP12.....	166
Figura 10.72. Gráfica de alcalinidad de la muestra JLP12.	166
Figura 10.73. Gráfica de pH de la muestra JLP13.	167
Figura 10.74. Gráfica de conductividad eléctrica de la muestra JLP13.....	168
Figura 10.75. Gráfica de alcalinidad de la muestra JLP13.	168
Figura 10.76. Gráfica de pH de la muestra JLP14.	169
Figura 10.77. Gráfica de conductividad eléctrica de la muestra JLP14.....	170
Figura 10.78. Gráfica de alcalinidad de la muestra JLP14.	170

1. Introducción

La minería en México tiene presencia en 24 de las 32 entidades del país (CAMIMEX, 2015).

La actividad minera es muy importante debido a que a través de ella se obtienen los productos primarios indispensables, tanto para desarrollar artículos de primera necesidad como los necesarios para el desarrollo y aplicación de nuevas tecnologías.

Con el desarrollo de la minería, el país se ha beneficiado tanto social como económicamente; sin embargo, existen efectos adversos al ambiente provocados por la explotación de los minerales.

La excavación, la remoción de minerales, el proceso y la extracción de metales puede causar daños ambientales y, en casos extremos, destruir el ecosistema; por ejemplo, se pueden dañar tierras de cultivo, favorecer la erosión y contaminar cuerpos de agua con sales solubles de elementos potencialmente tóxicos (EPT), como As, Se, Pb, Cd y óxidos de S, entre otros. Asimismo, el material subterráneo puede generar volúmenes de residuos hasta ocho veces superiores al original. Las industrias especializadas en el proceso de metales (siderúrgicas y metalúrgicas) pueden emitir partículas de dimensiones micrométricas, que son fácilmente transportables por el viento a grandes distancias y causar problemas a la salud de los habitantes en las inmediaciones (Csuros y Csuros, 2002).

La actividad minera metálica y la no metálica se diferencian básicamente por los procesos metalúrgicos a los que deben someterse los minerales obtenidos; en la primera los procesos para poder extraer el o los elementos de interés económico son complejos, mientras que en la segunda los procesos de transformación son más simples. Los residuos generados por ambas industrias también son diferentes. Los que provienen de la minería metálica son de mayor relevancia ambiental debido a los enormes volúmenes que genera esta actividad y, cuando se encuentran asociados con minerales sulfurosos, debido a la posible generación de drenaje ácido y a la liberación de EPT al ambiente (Baker y Banfield, 2003; Dold y Fontbote, 2001).

La generación de drenaje ácido es un problema económico, de responsabilidad social y ambiental que la industria minera enfrenta, el desarrollo de la acidez puede tomar años o décadas, y puede continuar durante siglos. Actualmente el gobierno mexicano, a través de diferentes normas, exige que la industria minera asuma estas responsabilidades, debido a ello las compañías mineras deben conocer las características de los residuos que generan para que de esta forma puedan determinar si son o no generadores de drenaje ácido y en caso necesario poder establecer medidas de control.

1.1 Justificación

Dada la importancia de la explotación de minerales y la consecuente generación de residuos, se requiere disponer de legislación, reglamentación y normativa amplia y eficaz. Las autoridades ambientales en la actualidad supervisan la operación de las minas en general, y en particular de las presas de jales, en apego a la NOM-157-SEMARNAT-2009, que establece los elementos y

procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros, y asigna al generador la responsabilidad de identificar sus residuos en función del proceso que los genera.

Dicha norma establece que el generador identificará sus residuos en función del proceso que los genera. La clasificación está dada por los residuos provenientes del minado, aquellos provenientes del beneficio de minerales y los residuos de procesos hidrometalúrgicos. Los jales forman parte de la segunda clasificación.

La caracterización de los residuos mineros se lleva a cabo por medio de muestreos para determinar su peligrosidad. Dicho muestreo está en función del estado de operación de los procesos de separación del mineral de interés. Por una parte, al inicio de operaciones o cuando se modifiquen los procesos, las muestras se toman de las pruebas metalúrgicas que se realizan en el laboratorio. Por otra parte, durante la operación, las muestras se obtienen de las corrientes donde se generen los residuos o directamente de los depósitos de residuos, mediante un compósito anual.

Por su parte la NOM-141-SEMARNAT-2003, que establece el procedimiento para caracterizar los jales, incluye el procedimiento para determinar si los jales son generadores de ácido mediante la determinación del potencial de acidez, por medio del método de Prueba Modificada de Balance Ácido Base, conforme a la NMX-B-400-1970, que establece el método de análisis químico para la determinación gravimétrica de azufre en minerales de hierro, con apoyo de la NMX-B-021-1982, la cual establece la determinación de las formas de azufre en el carbón y el método turbidimétrico de la EPA-9038, que calcula los sulfatos. Cuando la relación Potencial de Neutralización (PN)/ Potencial Ácido (PA) sea menor a 1.2, se considera que los jales son generadores potenciales de ácido.

Asimismo, la NOM-141-SEMARNAT-2003 establece que las muestras de jal para la determinación analítica deben ser tomadas directamente del área de almacenamiento o de las pruebas metalúrgicas realizadas al inicio de la operación de la unidad minera.

El Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la División de Ingenierías Civil y Geomática de la Facultad de Ingeniería de la UNAM tiene vinculación con algunas empresas mineras, y se ha conocido su inquietud con respecto a la forma en que se toman las muestras de jales para evaluar su peligrosidad, porque consideran que el criterio no es objetivo por las siguientes razones:

- 1) La obtención de únicamente un compósito de muestra de la descarga cuando está en operación de la unidad minera no es representativa de la composición de los residuos mineros que se encuentran ya depositados en las presas de jales. La descarga no permite valorar la peligrosidad de lo que ya está acumulado, ya que, los residuos pueden estar o no oxidados y contener distinta composición de acuerdo al proceso que se llevó a cabo en la planta de beneficio.
- 2) No se presenta en la normativa aplicable criterios claros y objetivos para muestrear jales distribuidos en las presas.

La presente tesis lleva a cabo la aplicación de la prueba de celdas húmedas que establece la NOM-157-SEMARNAT-2009 para demostrar su utilidad y evaluar su realización para la estimación de drenaje ácido.

Un porcentaje alto de residuos mineros se generó antes de este siglo, cuando no existía ningún tipo de legislación ni control ambiental. A través del tiempo, los procesos de beneficio de minerales han evolucionado, por lo que, a su vez, se ha transformado la composición de los residuos generados a través del tiempo.

La NOM-141-SEMARNAT-2003, referente al procedimiento para caracterizar los jales, así como a las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales, establece un muestreo continuo de la descarga de la planta de beneficio en la cantidad necesaria para formar un compuesto que permita la evaluación de la peligrosidad a partir de cada tipo de mena. La selección del número de muestras está en función del peso en toneladas de las reservas. Sin embargo, no establece un procedimiento de muestreo detallado y representativo de la totalidad de los residuos dispuestos en las presas de jales que permita su caracterización.

Es pertinente mencionar que durante las administraciones de los expresidentes Vicente Fox y Felipe Calderón, se otorgaron a empresas mineras nacionales y extranjeras 4 mil 949 permisos para explotar 9 millones 615 mil 435.36 hectáreas del territorio nacional (La Jornada, 20 de septiembre de 2015), lo cual implica el desarrollo de una gran cantidad de proyectos para la explotación de minerales, lo que generará una gran cantidad de residuos mineros adicionales a los ya existentes, cuyas características será necesario analizar para evaluar y controlar su potencial de contaminación.

En virtud de lo anterior, la presente tesis aborda distintos procedimientos aplicados en otros países, tanto de diseño de muestreo como procedimientos de laboratorio, con el fin de contrastarlos para así proponer el método más eficaz.

1.2 Objetivos

1.2.1 General

Demostrar la utilidad de las pruebas de celdas húmedas para la estimación del drenaje ácido de minas.

1.2.2 Particulares

Revisar el estado del arte y las buenas prácticas de muestreo de jales y procedimientos de laboratorio empleados en otros países.

Analizar los procedimientos empleados en la estimación del drenaje ácido en muestras de jal.

Aplicar diferentes procedimientos de análisis en laboratorio al jal dispuesto en la presa de la mina Purísima, ubicada en el municipio de Zimapán, Estado de Hidalgo.

1.3 Alcances

Aplicación de la metodología propuesta para el análisis de laboratorio de jales mineros.

Aplicación de una prueba estática, una prueba cinética, un análisis químico y un análisis mineralógico que permita estimar el potencial de generación de drenaje ácido en muestras de jales.

Analizar los resultados y evaluar el procedimiento de análisis en laboratorio de celdas humedad.

1.4 Metas

Exponer el procedimiento de análisis en laboratorio que establece la NOM-141-SEMARNAT-2003 y la NOM-157-SEMARNAT-2009.

Plantear los resultados del estudio a la Cámara Minera de México (CAMIMEX), con la finalidad de que en el futuro la Cámara tenga elementos científicos y técnicos para proponer los cambios necesarios a la Norma Oficial Mexicana aplicable.

2. Antecedentes

En la presente tesis el caso de estudio que se aborda se refiere a una planta industrial de la minería metálica.

2.1 Minería metálica y no metálica

La minería metálica incluye los procesos de exploración y explotación de minerales metálicos que, por sus propiedades físicas y químicas, presentan un alto valor económico. Los métodos para la obtención pueden ser a cielo abierto o de manera subterránea. Los minerales metálicos que presentan características de maleabilidad, ductibilidad, y buena conductibilidad de calor y electricidad. En este grupo de minerales se encuentran el oro, la plata, cobre, zinc, aluminio, níquel, plomo, cromo, selenio y platino, entre otros.

La minería no metálica consiste en las actividades de explotación de recursos minerales que, de acuerdo a sus propiedades físicas y químicas, son considerados de valor económico, estableciéndose como minerales industriales y agrícolas mediante procesos. Dichos minerales no presentan brillo propio ni conducen la electricidad, entre estos minerales se encuentran principalmente los carbonatos como la caliza y la dolomita, así como sulfuros, magnesita, sales, talco, asbestos, cementos, yeso, gravas, arenas, mármol, granito, arcillas, entre otros. Esta actividad representa un valor económico menor a la minería metálica sin dejar de aportar en el desarrollo de los países.

2.2 La minería en México

En México la industria minera representa un porcentaje considerable en el producto interno bruto. De acuerdo con el informe anual del 2015 de la Cámara Minera de México (CAMIMEX), la participación del sector minero-metalúrgico representó el 8.9 por ciento del PIB Industrial y 3 por ciento del Producto Nacional, de acuerdo con datos del Sistema de Cuentas Nacionales 2008 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), además, la inversión extranjera directa en minería en México, de acuerdo con datos de la Secretaría de Economía, de enero a diciembre de 2014 ascendió a 2 mil 117 millones de dólares, una baja de 59 por ciento respecto a 2013.

La Industria Minera Mexicana se ha consolidado como uno de los sectores industriales que más divisas genera al país, durante 2014 alcanzó 17 mil 53 millones de dólares, ocupando la cuarta posición, sólo debajo del sector automotriz, el electrónico y el petrolero (CAMIMEX, 2015).

En México los minerales pueden ser clasificados como minerales concesibles y no concesibles para fines de explotación, los primeros son aquellos que, de acuerdo a la Ley de minería, sólo pueden ser explotados con la autorización otorgada por el gobierno, mientras que los segundos no requieren de un permiso por parte del gobierno para ser explotados.

Durante el periodo 2000-2012, se otorgaron a empresas mineras nacionales y extranjeras un total de 4 949 permisos para explotar 9,615,435.36 hectáreas del territorio nacional (La Jornada, 20 de septiembre de 2015), marcando una importante tendencia hacia el desarrollo de una gran cantidad de proyectos para la explotación de minerales en toda la República. La Tabla 2.1 y la Figura 2.1 muestran los principales proyectos destinados a la explotación de la plata en el país.

Tabla 2.1. Principales proyectos para la explotación de plata en México

Proyecto	Empresa	Estado	Producción miles de Oz	Inversión (Us Millones)	Fecha de inicio
San Julián	Fresnillo plc.	Chihuahua	10.3	515	2015
La Encantada (expansión)	Firts Majestic	Coahuila	4.0-4.5	N.D.	2015
La Tesorería (planta)	Arian Silver	Zacatecas	N.D.	N.D.	2015
Planta de Tratamiento Piritas	Fresnillo plc.	Zacatecas	3.5	105	2016
Terroneras	Endeavour Silver	Jalisco	N.D.	N.D.	2016
La Colorada (expansión)	Pan American Silver	Zacatecas	7.7	105	2017
Fresnillo (expansión)	Fresnillo plc.	Zacatecas	8	100	2017
Rey de Plata	Peñoles	Guerrero	N.D.	268	2017
Juancipio	Fresnillo plc.- MAG Silver	Zacatecas	10	N.D.	2018
Metates	Chesapeake	Durango	16	N.D.	N.D.

N.D.= No disponible

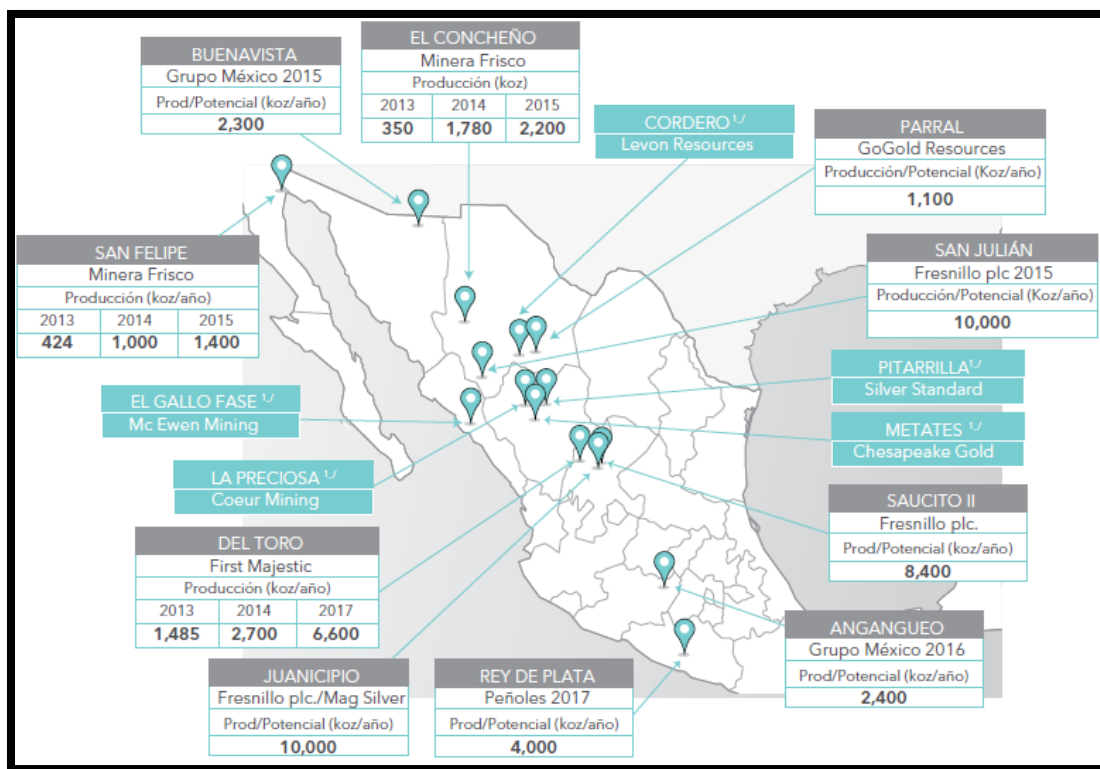


Figura 2.1. Principales proyectos y cambios en la producción minera de plata en México (CAMIMEX, 2015).

2.3 Yacimientos minerales en México

Las 32 entidades federativas de la República Mexicana cuentan con yacimientos mineros. A nivel nacional destaca la producción de 10 minerales (oro, plata, plomo, cobre, zinc, fierro, coque, azufre, barita y fluorita), seleccionados por su importancia económica y su contribución a la producción nacional (INEGI, 2015).

En la Tablas 2.2 se muestra la producción en el país de los principales minerales, en ella se puede observar el volumen que se maneja en más de 15 estados de la República, demostrando la participación de la minería en gran parte del país.

Tabla 2.2. Producción minera según principales estados productores durante febrero de 2015 en toneladas (INEGI, 2015).

Mineral/Estado	2014	2015*	Variación % anual
Oro	9,909	10,206	3.0
Sonora	2,831	2,784	(-) 1.6
Zacatecas	2,004	2,559	27.7
Chihuahua	2,306	1,583	(-) 31.3
Durango	848	1,200	41.5
Guerrero	779	552	(-) 29.2
Plata	452,462	453,356	0.2
Zacatecas	193,098	184,388	(-) 4.5
Chihuahua	78,129	74,385	(-) 4.8
Durango	55,391	63,096	13.9
Sonora	30,907	25,714	(-) 16.8
Oaxaca	17,008	20,184	18.7
Estado de México	17,542	17,096	(-) 2.5
Guanajuato	14,410	15,410	6.9
Plomo	21,046	18,959	(-) 9.9
Zacatecas	11,572	11,429	(-) 1.2
Chihuahua	4,832	3,535	(-) 26.8
Durango	1,947	1,765	(-) 9.3
Cobre	39,569	43,166	9.1
Sonora	30,244	35,165	16.3
Zacatecas	4,042	3,345	(-) 17.2
San Luis Potosí	1,820	2,034	11.8
Zinc	57,012	53,952	(-) 5.4
Zacatecas	24,601	24,284	(-) 1.3
Chihuahua	10,325	10,123	(-) 2.0
Durango	10,392	8,758	(-) 15.7
Estado de México	3,442	3,392	(-) 1.5
San Luis Potosí	1,885	2,670	41.6
Coque	180,086	157,183	(-) 12.7
Coahuila de Zaragoza	146,187	129,502	(-) 11.4
Michoacán de Ocampo	33,899	27,681	(-) 18.3
Hierro	1,309,028	1,103,125	(-) 15.7
Michoacán de Ocampo	531,081	356,727	(-) 32.8

Mineral/Estado	2014	2015*	Variación % anual
Coahuila de Zaragoza	230,582	249,827	8.3
Durango	64,813	128,280	97.9
Colima	225,091	79,060	(-) 64.9
Chihuahua	23,666	22,287	(-) 5.8
Azufre	89,116	83,132	(-) 6.7
Tabasco	25,773	24,756	(-) 3.9
Chiapas	24,910	23,633	(-) 5.1
Veracruz de Ignacio de la Llave	9,114	9,795	7.5
Nuevo León	8,979	8,626	(-) 3.9
Tamaulipas	9,601	7,237	(-) 24.6
Flourita	95,147	97,182	2.1
San Luis Potosí	87,338	91,330	4.6
Coahuila de Zaragoza	7,796	5,815	(-) 25.4

Oro y plata en kilogramos. *Cifras preliminares.

2.4 Residuos provenientes de la minería

En las zonas mineras frecuentemente existe la presencia de minerales sulfurosos en los yacimientos minerales, así como en las plantas de beneficio de las empresas mineras y en los residuos o jales que se depositan en las presas.

Tanto los residuos mineros generados en años anteriores como los actuales provenientes de la explotación de yacimientos, contienen sulfuros metálicos, entre los cuales se encuentran cantidades residuales de pirita (FeS_2), pirrotita ($\text{Fe}_{1-x}\text{S}_2$), galena (PbS), esfalerita (ZnS), calcopirita (CuFeS_2) y arsenopirita (FeAsS) (Flores, 2013). Asimismo, presentan concentraciones de reactivos químicos utilizados en el proceso de beneficio para separar el mineral de interés de la roca, algunos de los cuales son tóxicos y/o peligrosos (Ver a detalle Capítulo 3.3), así como pequeñas concentraciones de minerales de valor económico que no se lograron separar en dicho proceso.

La mineralogía de los yacimientos es de gran importancia ya que su composición propiciará o no la generación de drenaje ácido en los residuos mineros, además las características climáticas del sitio constituyen otro factor principal que influye de manera directa en este proceso, siendo determinantes en la generación y dispersión de estos residuos y sus lixiviados al entorno (Romero et al., 2008).

El primer proceso químico que se presenta en los jales es su oxidación, en ella intervienen los minerales metálicos y no metálicos que estén presentes en los residuos.

El siguiente proceso químico se da en presencia de agua y aire, y consiste en la oxidación de los sulfuros metálicos, ocasionando la generación de drenaje ácido de mina.

El drenaje ácido se caracteriza por presentar valores bajos de pH y, generalmente, altas concentraciones de sulfatos y Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) disueltos (Romero et al., 2008). La oxidación de los sulfuros metálicos en los residuos mineros es, habitualmente, muy limitada durante la operación de la mina y se desarrolla lentamente con el paso del tiempo, una vez que las presas de jales llegan a su capacidad, deteniendo así la acumulación de los residuos y la porosidad de éstos, es cuando lentamente se permite la difusión del aire y agua propiciando el proceso.

Es pertinente mencionar que la oxidación de ciertos componentes de los jales mineros, como son los sulfuros metálicos, no siempre tiene el potencial de generar drenaje ácido, ya que se involucran otros factores para que se propicie el proceso. Además de los minerales productores potenciales del drenaje ácido (sulfuros metálicos), existen minerales que son consumidores potenciales de acidez como son los carbonatos, hidróxidos y silicatos. La capacidad de que los jales generen el drenaje ácido está en función del balance entre ambos minerales. Al proceso en el que los minerales no metálicos tienen la capacidad de consumir acidez se le conoce como neutralización. Si esta capacidad de neutralización es mayor que la capacidad de generación por parte de los sulfuros metálicos, los residuos se clasifican como No generadores de drenaje ácido de mina, debido a que en el primer proceso de oxidación, la disolución de los minerales alcalinos presentes en los residuos, consumen de manera eficiente la producción de acidez.

3. Zona de estudio

La planta de beneficio se seleccionó considerando criterios de tipo técnico y práctico. El principal criterio técnico es que se trate de minería de minerales metálicos. Los principales criterios prácticos son el costo del trabajo de campo, debido a que se cuenta con fondos limitados para la investigación; a su vez, el costo depende de la distancia a la mina, que influye también en el manejo de las muestras. Otro de los aspectos considerados fue el contar con la autorización de la empresa minera para la toma de muestras.

Se seleccionó a la empresa que se describe a continuación para realizar el estudio:

Empresa: Compañía Minera y Beneficiadora Purísima, S de R. L.

Sector: Minería de metales no ferrosos (plata, plomo, cobre y zinc).

3.1 Ubicación

El predio en estudio, se ubica a 2 km de la Cd. de Zimapán (dirección sur-poniente), en el predio denominado “La Lincera”, Barrio el Calvario, municipio de Zimapán, Hidalgo.

Coordenadas geográficas:

Latitud Norte: 20°43'48”

Longitud Oeste: 99°23'26”

Latitud Norte: 20°43'53” (carta topográfica INEGI)

Longitud Oeste: 99°22'58” (carta topográfica INEGI)

3.2 Características generales

Zimapán se localiza en la parte central de México, donde el clima es semiseco y semiseco-templado, con temperatura media anual de 18.9 °C. Los registros históricos que van del año 1950 al 2010 del Servicio Meteorológico Nacional, muestran una precipitación pluvial promedio al año de 449.3 mm. La precipitación máxima se presenta en el mes de junio con valores de 73.2 mm y la precipitación mínima ocurre en el mes de febrero con valores de 7.9 mm.

Tabla 3.1. Temperaturas máximas, mínimas, medias y precipitación de Zimapán, periodo de 1950-2010 (SMN, 2015).

TEMPERATURA MÁXIMA		TEMPERATURA MEDIA		TEMPERATURA MÍNIMA		PRECIPITACIÓN	
MES	°C	MES	°C	MES	°C	MES	mm
ENERO	23.8	ENERO	15	ENERO	6.1	ENERO	14
FEBRERO	25.7	FEBRERO	16.3	FEBRERO	7	FEBRERO	7.9
MARZO	28.9	MARZO	19	MARZO	9.2	MARZO	8.9
ABRIL	30.7	ABRIL	21.2	ABRIL	11.7	ABRIL	33.9
MAYO	30.8	MAYO	22.2	MAYO	13.5	MAYO	51.7
JUNIO	28.7	JUNIO	21.3	JUNIO	14	JUNIO	73.2

TEMPERATURA MÁXIMA		TEMPERATURA MEDIA		TEMPERATURA MÍNIMA		PRECIPITACIÓN	
MES	°C	MES	°C	MES	°C	MES	mm
JULIO	27.1	JULIO	20.4	JULIO	13.6	JULIO	71.9
AGOSTO	27.5	AGOSTO	20.5	AGOSTO	13.5	AGOSTO	65.9
SEPTIEMBRE	26.6	SEPTIEMBRE	19.9	SEPTIEMBRE	13.2	SEPTIEMBRE	67
OCTUBRE	26.1	OCTUBRE	18.5	OCTUBRE	10.9	OCTUBRE	35.9
NOVIEMBRE	25.8	NOVIEMBRE	17.1	NOVIEMBRE	8.3	NOVIEMBRE	10
DICIEMBRE	24.2	DICIEMBRE	15.7	DICIEMBRE	7.2	DICIEMBRE	9

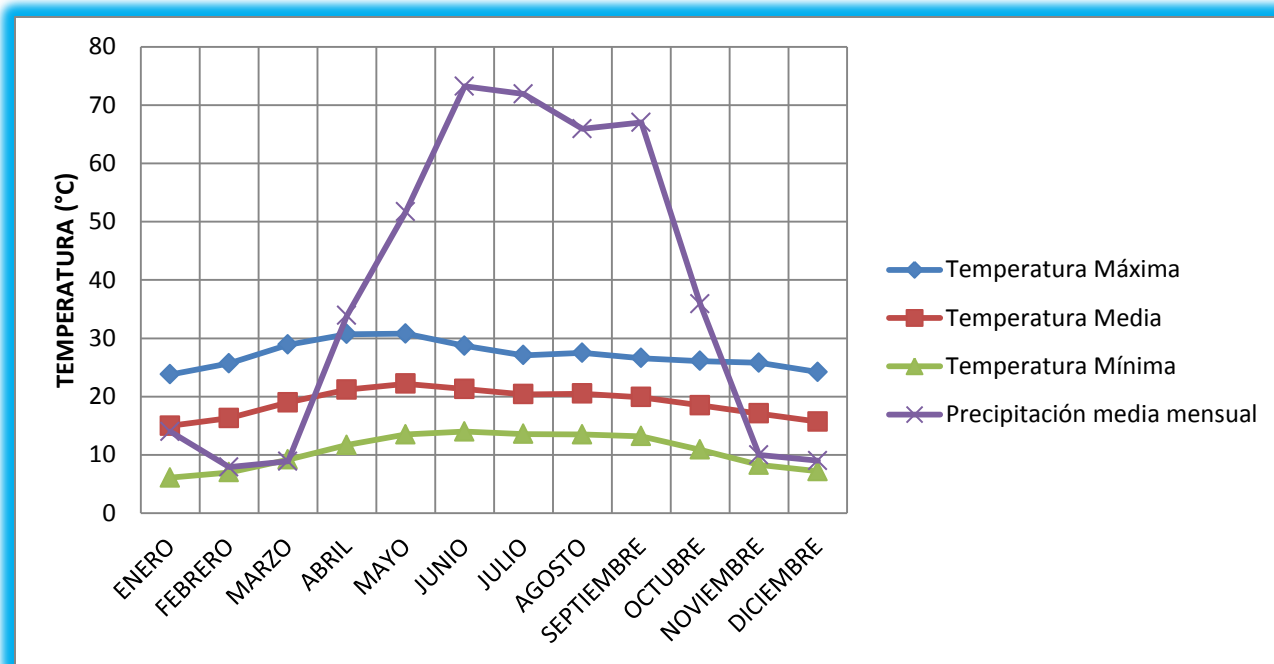


Figura 3.1. Gráfica de las temperaturas, máximas, medias, mínimas y precipitación de la región de Zimapán, Estado de Hidalgo. Elaborada con datos del Sistema Meteorológico Nacional, (SMN).

La mineralogía del lugar está compuesta por rocas metamórficas regionales o de contacto constituidas por silicatos de Ca, Mg y Fe, así como de chimeneas, mantos y vetas. La mineralización está encajonada en rocas calizas del cretácico. Los sulfuros metálicos reportados son pirita (FeS_2), pirrotita (Fe_{1-x}S), esfalerita (ZnS), galena (PbS), calcopirita (FeCuS_2) y arsenopirita (FeAsS).

En el estado de Hidalgo operan tres Distritos Mineros: Pachuca–Real del Monte, Molango y Zimapán, éste último dejó de estar activo de 1988 a 1990 debido a la reducción en el precio de los metales a nivel mundial, lo cual hace incosteable la actividad.

3.3 Proceso de beneficio

El proceso de beneficio incluye operaciones de trituración, molienda y flotación diferencial, para obtener como producto concentrados de plata, plomo, cobre y zinc. El proceso inicia con la recepción de la materia prima consistente en sulfuros de plata, de plomo, de cobre y de zinc, provenientes de dos minas de minerales metálicos de la región, una llamada Mina del Monte otra llamada Mina La Purísima, ambas ubicadas en la región minera; dicho mineral es triturado, molido y sometido al

proceso de flotación diferencial y separación, obteniéndose como producto final: concentrados de zinc, cobre y plomo.

La capacidad instalada de la planta es para procesar 750 toneladas diarias, con una capacidad útil de 700 toneladas por día.

❖ Planta de beneficio

El diseño aprovecha el desnivel del terreno a fin de lograr un ahorro de energía mediante el flujo de la materia prima por gravedad.

La planta cuenta con las siguientes áreas:

- Laboratorio de pruebas
- Almacén de reactivos
- Almacenes de producto (concentrados de zinc, cobre y plomo)

❖ Áreas de servicio

Taller de mantenimiento: cuarto adjunto a la nave para el beneficio.

Caminos de acceso: cuenta con 8 metros de ancho, es de terracería y comunica a la Cabecera Municipal con el predio La Lincera.

Caminos de tránsito interno (5.0 km) que comunican a la presa de jales, planta, tolvas y a los depósitos de agua.

Tanques de almacenamiento de agua: cuatro depósitos superficiales con capacidad individual de 800 m³.

Comedor: con los servicios de estufa, refrigerador y mesas.

Subestación eléctrica: de mediana tensión, (23 kV) de capacidad, tipo compacta servicio interior.

Almacén de residuos industriales peligrosos: para su acopio temporal.

❖ Presa de jales

La estructura para el almacenamiento se encuentra en la base de una colina, la cortina contenedora se forma como resultado del depósito de jales en el vaso de la presa, el diseño consiste en terrazas, la represa se forma por sedimentación y decantación natural, en la periferia se depositan las arenas y gruesos, el agua y los finos en el centro. El jal se recolecta en una lumbrera o tubo central para coleccionar el agua y aprovecharla mediante bombeo conduciéndola a la pila de recuperación y posteriormente reintegrarla al proceso. La tubería tiene una pendiente aproximada del 10% descendiente de norte a sur. La capacidad de almacenamiento se estima en 750,000 m³, y una vida útil de 20 años.

❖ Características de los jales mineros

La mayoría de los compuestos químicos orgánicos en solución en la pulpa de los jales, son oxidados en el estanque de desecho, por lo que no se encontrarán en los efluentes finales, esta medida ayuda a evitar que los sulfatos al oxidarse formen costras duras que impedirían o limitarían el drenaje en el depósito.

En consecuencia, los jales presentan concentraciones o trazas de:

→ Plomo

- Zinc
- Cobre
- Plata
- Sulfato de zinc ($\text{Zn SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)
- Sulfato de cobre ($\text{Cu SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)
- Cianuro de sodio

En el Distrito Minero de Zimapán, con historia minera de 5 siglos, los procesos han evolucionado desde el beneficio de patio hasta la lixiviación por cianuración.

Un estudio desarrollado por investigadores de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, UAEH, en los Jales de Santa María y San Miguel del Distrito Minero Zimapán identifica los siguientes elementos químicos presentes (Reyes, 2009):

Abundancia de arsenopirita, pirita, pirrotita, y sulfosales de plomo, altos contenidos de zinc y cadmio que evidencian la presencia de esfalerita, hierro, calcita y cuarzo, acompañada de yeso y/o brucita, alta correlación de plata con antimonio y plomo, arsénico correlacionado plomo, selenio y con hierro como arsenopirita. El arsénico proviene de la presencia de sulfonales (serie sólida) contenidos en los yacimientos, tal como: pirargirita-proustita, tetraedrita-tenantita, polibasita-paepearceíta y jamesonitadufrenoisita.

El arsénico es un elemento nocivo de origen natural, presente en el agua de las minas, en la arsenopirita y de la amplia variedad de sulfonales contenidos en los yacimientos.

❖ Productos extraídos

Los productos son: concentrados de plomo, cobre y zinc, los cuales se embarcan a granel para su comercialización. El concentrado de plomo es una combinación de plata con plomo.

El proceso consta de las siguientes etapas de acuerdo a la manifestación de impacto ambiental que elaboró la empresa en el 2009:

1. Recepción del mineral

El material de la mina es transportado a la planta en camiones de volteo.



Figura 3.2. Recepción de la roca que contiene el mineral de interés.

2. Pesado en báscula

Se realiza para conocer el tonelaje de ingreso a la planta y controlar pesos y volúmenes de proceso.

3. Almacenamiento de materia prima

El material es depositado en un patio destinado para ello, en espera de su turno para entrar al proceso.

4. Trituración

Consiste en disminuir el tamaño del material proveniente de la mina. El material entra a un sistema de trituración primaria. En esta fase la tolva de gruesos es alimentada con la carga de camiones de 10 y 20 toneladas y es recibida por la quebradora de quijada, la cual reduce el material desde un metro de diámetro hasta 5".

El material pasa mediante una banda transportadora a la trituración secundaria donde se fractura el material de 40" a 3/8" aproximadamente.

La trituración terciaria: se realiza en una criba de quijada, el material pasa a la banda transportadora, que conduce el mineral triturado a una criba vibratoria, que tiene un tamiz de 15/16 por una pulgada de abertura, con un solo piso de clasificación que descarga finos y gruesos, el producto de menos media pulgada se va a tolva de molinos y el producto mayor de ½ pulgada se regresa a la trituradora secundaria y terciaria, por medio de una banda transportadora.



Figura 3.3. Trituración del material proveniente de la mina.

5. Molienda

Este proceso reduce el material de media pulgada a 64 micras.

El mineral es descargado en las tolvas de finos de donde alimentan directamente al molino de bolas, donde se hace una molienda en húmedo con un promedio del 3% de sólidos.

La descarga del molino se bombea a presión en un circuito cerrado donde el material fino se manda a flotación en un tanque acondicionador y el material grueso regresa al molino para terminar de ser molido.

En el molino se adicionan parte de los reactivos (sulfato de zinc, cianuro de sodio, xantato 343, Promotor A-404, Promotor A-5460 y Espumante Dow- 250), con los que se llevan a cabo la flotación de los diferentes minerales. La descarga de la molienda es 35 % en sólidos.



Figura 3.4. Molienda por medio de un molino de bolas.



a)



b)



c)

Figura 3.5. Reactivos, sulfato de zinc (a), sulfato de cobre (b) y cianuro de sodio (c).

6. Concentración por flotación

En el tanque acondicionador se prepara una mezcla de mineral con agua, al 33% de sólidos; Los reactivos usados son para obtener, minerales de plata, plomo y cobre.



Figura 3.6. Circuito de flotación.

7. Flotación mixta plomo-cobre

La pulpa primaria es enviada a un circuito de flotación, en donde el mineral flotado es un concentrado de plomo-cobre; éste es enviado a otro banco de celdas, donde se adiciona cianuro de sodio, con lo que se deprime el cobre, y el plomo es flotado, llevándose de esta manera la separación de estos dos metales.

Los jales de este banco son enviados al banco de celdas de zinc.

8. Flotación del zinc

Los jales que proceden de la flotación primaria, son enviados a un tanque acondicionador, en donde se le agrega sulfato de cobre, xantato 343 y espumante Dow-250; una vez acondicionada la pulpa se envía a un banco de celdas donde se flota el concentrado de Zinc, pasando por dos etapas de limpia. En el circuito de zinc termina el proceso de flotación. Los jales finales son enviados como residuos minerales a la presa de jales, por gravedad o mediante bomba centrífuga de lodos, para su depósito y recuperación de una parte del agua que se utilizó en el proceso.

9. Espesamiento y filtro del concentrado

Cada uno de los concentrados obtenidos es enviado a los tanques de sedimentación, donde se separa una parte importante de agua al decantarse los sólidos. De los diferentes tanques, los lodos son pasados por sus filtros de disco donde se elimina el agua restante, hasta que quedan con un contenido de humedad del 8 al 10%, listos para ser enviados a procesos de fundición.

10. Disposición de los jales.

El mineral residual del proceso, llamado jal es enviado a una presa de jales, donde es confinado, en esta presa se lleva un control de los depósitos de tal forma que sea posible recuperar la mayor parte del agua y no existan derrames que contaminen los cauces superficiales.



a)



b)

Figura 3.7. Disposición de los residuos mineros en las presas de jales. Donde a) disposición de residuos mineros en una presa de jales y b) presa de jales sin operar.

4. Marco teórico

Este capítulo aborda los aspectos teóricos que fundamentan la presente investigación, así como la normativa aplicable en el país.

4.1 Definiciones

4.1.1 Residuo

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, en su Título primero, capítulo I, artículo 3º, fracción XXXII, define a un residuo de la siguiente forma:

“Cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control o tratamiento cuya calidad no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó”.

4.1.2 Residuo peligroso

Según lo establecido en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, en su Título primero, capítulo I, artículo 3º, fracción XXXIII, un residuo peligroso es:

“Aquél que posea alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad o que contengan agentes infecciosos que le confieran peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio y por tanto, representan un peligro al equilibrio ecológico o al ambiente”.

4.1.3 Jal minero

De acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, el jal minero queda definido como “Residuo sólido generado en las operaciones primarias de separación y de concentración de minerales”.

4.1.4 Presa de jales

La Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, precisa que la presa de jales es la “Obra de ingeniería para el almacenamiento o disposición final de los jales, cuya construcción y operación ocurren simultáneamente”.

Una de las principales características de la presa de jales es que se construye a medida que se explota el yacimiento mineral y se procesan los minerales. Es por ello que las dimensiones y la capacidad de almacenamiento de la presa, por lo general, aumentan con el paso del tiempo mientras se lleva a cabo la producción minera, hasta llegar al punto donde los bordos de contención de la misma ya no pueden ser elevados, lo que demanda un proceso continuo de construcción y la atención permanente a las cuestiones de seguridad asociadas a ello (Flores, 2013).

4.1.5 Drenaje ácido de minas

El Drenaje Ácido de Minas (DAM) es un término usado para designar al escurrimiento provocado por la oxidación de los sulfuros metálicos que contienen los residuos de la minería, por lo que proviene de las presas de jales y actividades mineras, debido a la exposición al ambiente, es decir, por la presencia de agua y aire.

4.2 Participación de la minería en la generación de residuos peligrosos (RP)

La aproximación más reciente sobre el volumen de generación de residuos peligrosos para el país se obtiene a partir de los registros que hacen las empresas incorporadas al Padrón de Generadores de Residuos Peligros (PGRP) ante la SEMARNAT. De acuerdo a la información contenida en dicho registro, para el periodo 2004-2011, las 68,733 empresas registradas generaron 1.92 millones de toneladas. Esta cifra, sin embargo, no debe considerarse como el volumen total de residuos peligrosos generados en el país en ese periodo, debido a que el PGRP no incluye a la totalidad de las empresas que producen estos residuos en el territorio.

El mayor volumen de generación de residuos peligrosos correspondió a la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM; 584,666 toneladas, es decir, poco más del 30% del volumen total generado), seguido por Chihuahua (342,650 toneladas, 18%), Campeche (210,037 toneladas, 11%), Tamaulipas (146,993 toneladas, 8%) y Nuevo León (128 849 toneladas, 7%). En contraste, los estados que reportaron menores volúmenes de RP fueron Nayarit (1190 toneladas), Baja California Sur (1,414 toneladas), Chiapas (1,555 toneladas) y Tlaxcala (1,586 toneladas), que en conjunto aportaron el 0.3% del total nacional (Figura 4.1).

Las industrias generadoras de residuos peligrosos que mayores volúmenes generaron entre 2004 y 2011 fueron la química (201,782 toneladas; 10.5% del total de RP generados), metalúrgica (186 393 toneladas; 9.7%), automotriz (170,194 toneladas; 8.9%), servicios mercantiles (111,907 toneladas; 5.8%) y la de equipos y artículos electrónicos (85,283 toneladas; 4.4%) (SEMARNAT, 2012) (Figura 4.2).

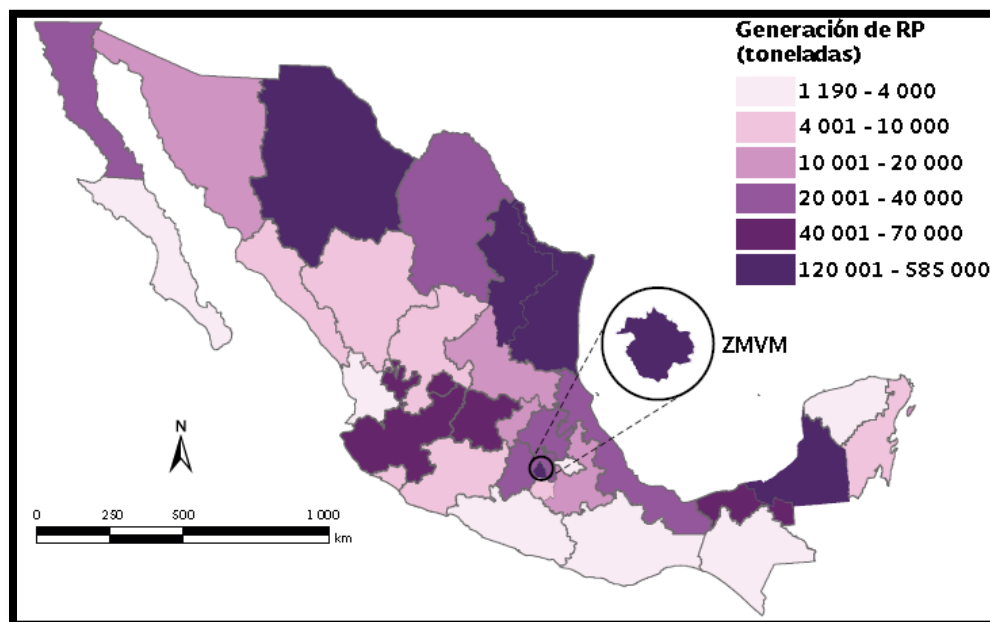


Figura 4.1. Generación de residuos peligrosos por región en México (SEMARNAT, 2012).

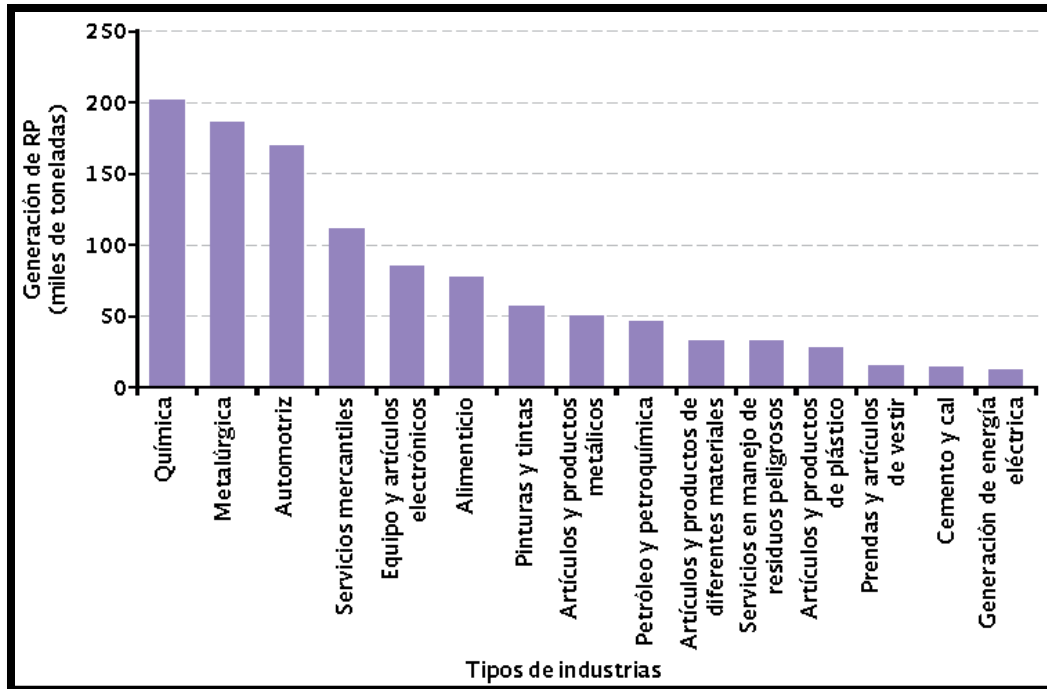


Figura 4.2. Generación de residuos peligrosos por tipo de industria en México (SEMARNAT, 2012).

4.3 Manejo de jales mineros en México

Como parte del manejo que se hace a los jales para poder separar el mineral de interés de la roca o de los materiales sin valor, frecuentemente se opta por dos métodos, la flotación y la hidrometalurgia, éste último consiste en la recuperación de metales mediante la aplicación de reacciones que ocurren en un medio acuoso (Cortinas, 2007). Como resultado de estos métodos son generados los residuos con un alto contenido de humedad y se disponen ya sea por gravedad o por bombeo a través de ductos en las presas de jales.

4.3.1 Características generales de los jales mineros

La mayoría de jales se encuentran en forma de lodos o de una mezcla líquida de materiales finos, que en cierta manera se comporta como un suelo, por lo que para su caracterización se utilizan los principios de la mecánica de suelos, para conocer su comportamiento y los procesos de consolidación que tienen lugar y la forma en que fluyen (Cortinas, 2007).

La mezcla líquida de la que forman parte estos residuos mineros contiene minerales que no fueron separados en los procesos de beneficio por carecer de valor y muchos de estos minerales ya sea en pequeñas o grandes concentraciones presentan características potencialmente tóxicas al medio ambiente.

4.3.2 Importancia del manejo de los jales mineros

De acuerdo al contenido de elementos potencialmente tóxicos en los residuos mineros y a la posible generación de drenaje ácido debida al intemperismo, dichos elementos pueden ser liberados y

disueltos en dicho drenaje ácido y ser conducidos a cuerpos de agua que se emplean como fuentes de abastecimiento de agua o transportados a los mantos freáticos como consecuencia de filtraciones en las presas al no contar con capas impermeables, así como fugas en las presas de jales debido a temblores y terremotos o por no contar con un diseño adecuado de las mismas.

En virtud de lo anterior, implica llevar a cabo revisiones periódicas, que adviertan la posible movilidad de estos contaminantes, por lo que se requiere contar con programas de manejo y protección del agua y suelo en todo el proceso de la minería.

4.3.3 Alteración de los jales a diferentes ambientes

El principal peligro en el almacenamiento de los residuos mineros es la generación de drenaje ácido, lo que provoca la liberación de elementos potencialmente tóxicos. Al ser liberados estos elementos pueden afectar la calidad del suelo, agua, aire y a la biosfera (figura 4.3).

4.3.4. Consecuencias de la alteración de los jales

Las afectaciones al ambiente, incluida la generación de residuos peligrosos, se relacionan con todos o alguno de los siguientes fenómenos (Gutiérrez, 2007):

- Destrucción de la capa de suelo e impactos en flora y fauna durante la explotación
- Formación de terreros y movimientos de sedimentos hacia cuencas del área.
- Oxidación de los minerales insolubles y formación de sustancias solubles ácidas con alto contenido de metales (drenaje ácido).
- Alto consumo de agua.
- Descarga de lixiviados con presencia de iones metálicos y reactivos tóxicos. En el caso de la hidrometalurgia el pH es muy ácido y la toxicidad mucho más elevada que en la flotación.
- Generación de jales como remanente del beneficio.
- Generación de aceites gastados, llantas, disolventes, polímeros, etcétera.
- Generación de ruido y emisiones (polvos, gases y humos).
- Generación de basura doméstica.
- Lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas.

El volumen de explotación que se produce varía mucho, de una relación de desperdicio a mineral de 1:1 hasta 6:1.

Durante el proceso de flotación, el mineral se muele y se separa de la ganga al hacerlo reaccionar con diferentes reactivos para que aumente su hidrofobicidad (rechazo al agua) lo que le permite flotar. También se moja la superficie de los minerales sin valor, de suerte que no floten. A continuación se listan los reactivos que se utilizan en el proceso de beneficio y que comúnmente forman parte de los jales (Gutiérrez, 2007):

- Ácidos: ácido sulfúrico.
- Alcalis: cal, carbonato de sodio e hidróxido de sodio.
- Selectores (modificadores de la superficie de la partícula mineral): sulfato de cobre; cianuro de sodio, sulfuro de zinc, sulfuro de sodio, silicato de sodio, bióxido de azufre y almidón.
- Colectores: xantatos de potasio o sodio, aminas y derivadas de las anilinas y aceites.
- Espumantes: aceite de pino, alcohol hexílico, poliglicoles, y orto-isobutil ditiocarbonato de sodio.

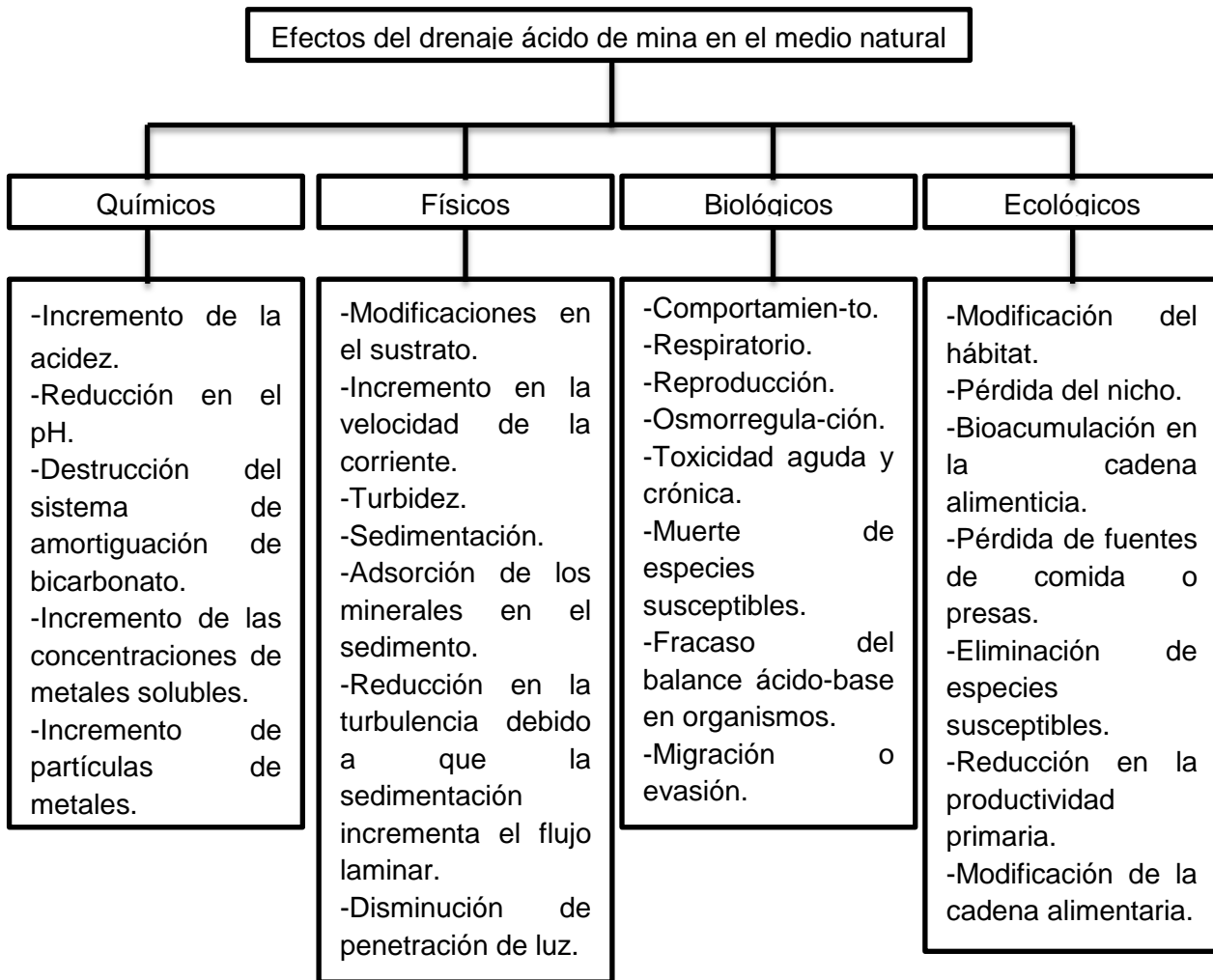


Figura 4.3. Los principales efectos del drenaje ácido sobre los sistemas lóticos. (Citado por López, 2013, modificado de Gray, 1997).

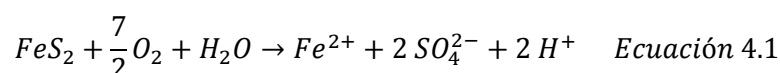
4.4. Principales procesos que ocurren en la oxidación de los residuos mineros

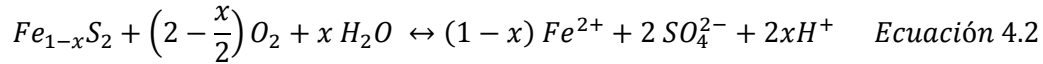
Los residuos mineros experimentan procesos en el suelo debido a la meteorización: la oxidación y la neutralización; asimismo, intervienen microorganismos presentes en el suelo que aceleran los procesos.

4.4.1 Oxidación

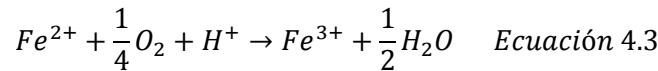
Los sulfuros metálicos contenidos en los jales se pueden oxidar al estar expuestos a los fenómenos de intemperismo (interacción con oxígeno y agua) (Citado por Salas, 2014, extraído de Dold, 2005).

Los sulfuros de hierro como son la piritita (FeS_2) y la pirrotita ($Fe_{1-x}S_2$) son los minerales más importantes, cuya oxidación puede generar drenaje ácido y la formación de oxihidróxidos de Fe que le dan la coloración café-rojo-amarilla a los jales oxidados, esto se puede presentar con las siguientes ecuaciones (Citado por Salas, 2014, extraído de Dold, 2005):

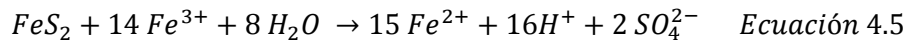
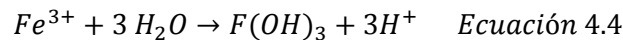




Posteriormente, el hierro ferroso (Fe^{2+}) reacciona con el oxígeno para formar hierro férrico (Fe^{3+}), lo que ocurre a través de la ecuación 4.3.



Dependiendo del pH en el sistema sólido/líquido, el hierro férrico (Fe^{3+}) tiende a precipitar como hidróxido férrico al hidrolizarse en condiciones de $pH > 3.5$ (Ecuación 4.4). Bajo condiciones de acidez, el ion férrico Fe^{3+} , permanece en solución y puede desempeñar el papel de oxidante (Ecuación 4.5)



Se ha reportado en la literatura que ciertas bacterias pueden acelerar la velocidad con la cual ocurren las reacciones anteriormente descritas (Citado en Flores, 2013, extraído de Evangelou y Zhang, 1995). La bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* es capaz de oxidar compuestos de azufre reducidos, así como oxidar el hierro ferroso en férrico. Otras bacterias conocidas que pueden catalizar la oxidación de los sulfuros metálicos son *Thiobacillus thiooxidans* y *Sulfolobus*.

La oxidación catalizada por bacterias ocurre en función de ciertos parámetros como (Citado por Salas, 2014, extraído de Dold, 2005):

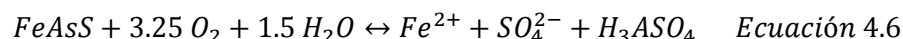
- Temperatura.
- pH.
- Disponibilidad de oxígeno.
- Disponibilidad de dióxido de carbono (fuente de carbono para la reproducción de las células).
- Nutrientes (Nitrógeno y Fósforo).
- Área superficial del mineral sulfuroso expuesto.

En general, las velocidades de las reacciones de oxidación aumentan conforme se incrementa la temperatura. Como regla empírica, las velocidades de reacción pueden duplicarse por cada $10^\circ C$ de aumento de temperatura. El proceso de oxidación del sulfuro es exotérmico, genera calor y aumenta la temperatura en el sitio de la reacción, por lo que el fenómeno en sí puede generar la temperatura necesaria para aumentar la velocidad de la reacción. Se han registrado temperaturas superiores a los $50^\circ C$ en almacenamientos de residuos mineros ubicados en regiones cuya temperatura de aire ambiental es menor a $5^\circ C$.

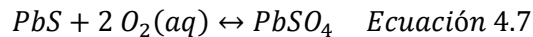
La oxidación inorgánica de los sulfuros metálicos puede crear condiciones ideales para el crecimiento de las bacterias oxidantes. La producción de H^+ y la consiguiente disminución del pH, hasta un nivel adecuado para las bacterias y el aumento de la temperatura son condiciones ideales para la actividad bacteriana.

Además de la piritita, arsenopiritita y pirrotita, los otros sulfuros metálicos comúnmente encontrados en jales, también se pueden oxidar a través de las reacciones que se presentan a continuación (Citado por Salas, 2014, extraído de Dold, 2005):

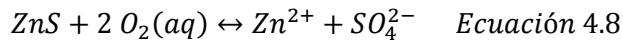
Arsenopiritita ($FeAsS$)



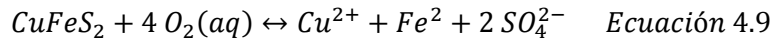
Galena (PbS)



Esfalerita (ZnS)



Calcopirita (CuFeS₂)

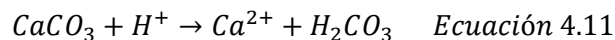
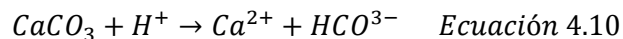


4.4.2 Neutralización

El proceso mediante el cual se consume ácido se denomina "neutralización" en el que participan un ácido y una base. En general, cuando la capacidad consumidora de ácido en los jales (potencial de neutralización) excede al potencial de generación de ácido, se consumirán todos los protones y el agua que drene del depósito tendrá un pH cercano al neutro.

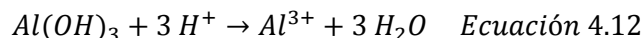
Existe una serie de minerales que pueden consumir acidez y neutralizar el drenaje ácido. Entre los minerales que consumen ácido se encuentran carbonatos, hidróxidos y aluminosilicatos.

El mineral más común que consume ácido es el carbonato de calcio (calcita CaCO₃), que consume acidez a través de la formación de bicarbonato HCO₃⁻ (Ec. 4.10) o ácido carbónico H₂CO₃ (Ec. 4.11). La calcita tiende a neutralizar soluciones hasta valores de pH entre 6.0 y 8.0.

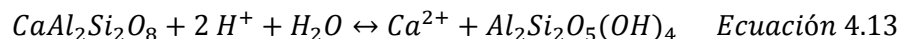


Otro carbonato que puede participar en la neutralización del DAM es la siderita (FeCO₃). Este mineral es menos soluble que la calcita, y tiende a amortiguar el pH en el rango de 4.5 a 6.0.

Los minerales que proporcionan alcalinidad, luego del consumo de los minerales carbonatados, generalmente son los hidróxidos. En la ecuación 4.12 se muestra la reacción de consumo de acidez (H⁺) por la disolución del Al(OH)₃.



Cuando se han agotado los carbonatos y los hidróxidos, entonces se propicia la alteración de los aluminosilicatos. Este proceso consume protones (H⁺) y libera cationes (Citado por Flores, 2013, extraído de Lin, 1997). En la ecuación 4.13 se puede observar la alteración de aluminosilicatos (anortita) que ocurre por el consumo de H⁺, lo que permite neutralizar el drenaje ácido.



La importancia de la neutralización del drenaje ácido por la disolución de carbonatos, hidróxidos y por la alteración de aluminosilicatos, es que bajo condiciones de pH neutro, la mayoría de metales presentan baja solubilidad y precipitan en la solución en forma de hidróxidos u óxidos metálicos; lo que es un mecanismo natural de retención de contaminantes.

4.5 Drenaje ácido de mina

El drenaje ácido es el escurrimiento de soluciones ácidas sulfatadas, frecuentemente con un contenido significativo de metales disueltos resultado de la oxidación química y biológica de minerales sulfurados

y de la lixiviación de metales pesados asociados. Las reacciones de oxidación ocurren en forma natural, y se aceleran por el aumento de exposición de la roca al oxígeno y al agua y por la acción catalizadora de algunas bacterias (Gobierno de Chile, 2002).

Generalmente, el drenaje ácido está caracterizado por un pH bajo (valores de pH entre 5 y 1.5); asociado a una acidez creciente en el tiempo y una alcalinidad decreciente, y por concentraciones elevadas de sólidos disueltos totales (SDT); de sulfato (2000 mg/L), de hierro y otros metales (Gobierno de Chile, 2002).

Las soluciones de drenaje ácido frecuentemente presentan un color café rojizo atribuido al ión Fe (III); sin embargo, también puede aparecer un color azul verdoso en el caso de que el hierro disuelto se encuentre en estado Fe (II), el cual tenderá a obscurecerse por oxidación a Fe (III), a medida que esté expuesto al oxígeno del aire. El drenaje ácido contiene en suspensión productos de reacciones de precipitación asociadas a los iones disueltos que le pueden dar distintos colores a la solución. Usualmente, cuando el escurrimiento de drenaje ácido es aireado, se forman manchas café rojizas en los cauces y canales del drenaje (Gobierno de Chile, 2002).

4.5.1 Fuentes de generación de drenaje ácido

Las fuentes principales de generación de drenaje ácido son las presas de jales, que son los lugares donde se acumulan los residuos mineros. Sin embargo, se debe considerar como fuente potencial a cualquier mineral sulfurado expuesto al aire y agua, ya sea en fuentes naturales o en una explotación minera (Gobierno de Chile, 2002).

4.5.2 Minerales sulfurosos que producen acidez al oxidarse

Los minerales sulfurados son de ocurrencia común en el ambiente geológico, se encuentran principalmente en rocas que yacen debajo de una capa de suelo, a menudo debajo del nivel freático. Estos minerales se ven expuestos constantemente al oxígeno y al agua por procesos naturales, como la erosión y la actividad tectónica (Gobierno de Chile, 2002). Dichos procesos se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Etapas de la generación del drenaje ácido (Gobierno de Chile, 2002).

Etapas de la generación de drenaje ácido	Mecanismos
Etapa 1	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Los minerales sulfurados, principalmente pirita (bisulfuro de hierro (FeS₂), son oxidados químicamente por el oxígeno del aire, que es el oxidante principal. El producto de esta reacción de oxidación es sulfato (SO₄)⁻², hierro ferroso (Fe⁺²) y protones (H⁺), los cuales generan acidez. ➤ ➤ En el rango normal de pH de suelos y agua (pH 5-7) los metales liberados por el desgaste de minerales generalmente precipitan y están relativamente inmóviles, debido a que los minerales alcalinos como la calcita (CaCO₃), presentes en la matriz de la roca neutralizan la acidez y originan la oxidación y precipitación del hierro como óxido o hidróxido. ➤ A medida que los minerales alcalinos se consumen, disminuirá el pH, pasando a la siguiente etapa de desarrollo del drenaje ácido.

Etapas de la generación de drenaje ácido	Mecanismos
Etapa 2	<ul style="list-style-type: none"> ➤ En esta etapa el pH del microambiente ha disminuido hasta 4.5; por lo que ocurren reacciones de oxidación tanto químicas como biológicas y si la oxidación continúa hasta que se haya agotado todo el potencial de neutralización, se presentarán valores de pH por debajo de 3.5. ➤ Existen concentraciones elevadas de hierro ferroso y sulfato y pese a la acidez relativamente alta. las concentraciones de metales en la solución pueden ser bajas.
Etapa 3	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Las reacciones de oxidación catalizadas por bacterias aumentan. ➤ Se produce hierro ferroso (Fe^{+2}), que se oxida biológicamente a hierro férrico (Fe^{+3}), el cual se convierte en el oxidante dominante, reemplazando al oxígeno. ➤ El drenaje se vuelve aún más ácido producto de la oxidación de sulfuros metálicos (ZnS, PbS, etc.), con mayores concentraciones de metales disueltos. ➤ La velocidad de oxidación es considerablemente más rápida que en la etapa I. Mediante estudios se ha podido observar que el aumento de las velocidades es de 10 a 1 millón de veces más.

En la Figura 4.4 se presentan los procesos que dan lugar a la generación de drenaje ácido.

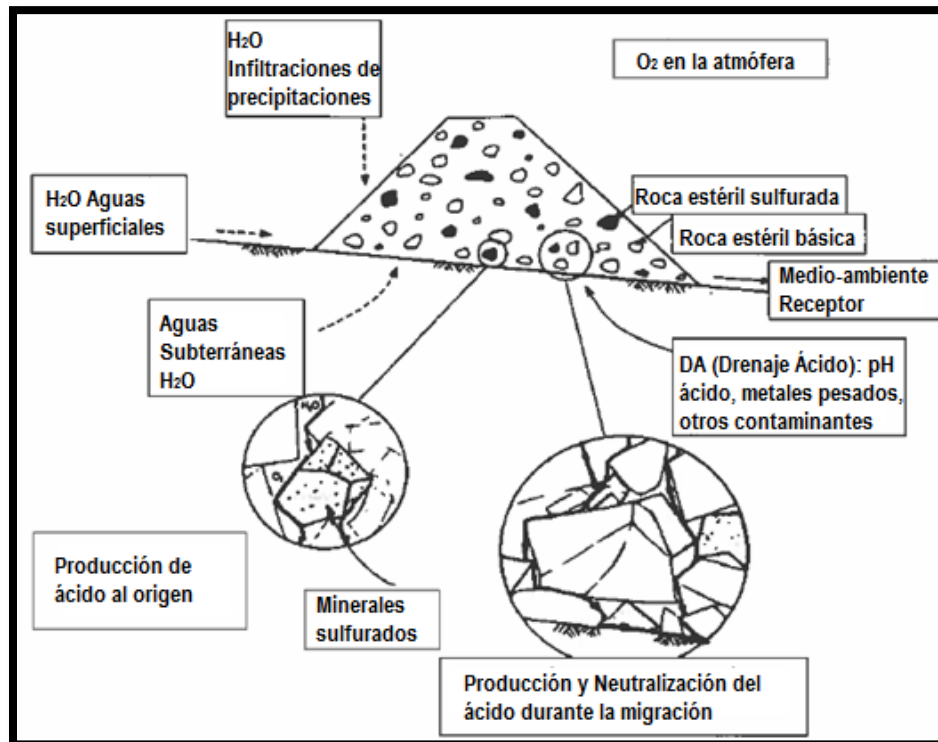


Figura 4.4. Dinámica de la generación de drenaje ácido en el medio ambiente (Gobierno de Chile, 2002).

Entre los sulfuros metálicos que se encuentran en los residuos mineros y que con la meteorización se oxidan se tiene principalmente a la Pirita (Fe_2S_3), Pirrotita ($Fe(1-x)S$), Calcopirita ($CuFeS_2$), Arsenopirita

(FeAsS), Esfalerita (ZnS) y Galena (PbS), todos ellos se oxidan dependiendo de su resistencia a dicha meteorización.

Tabla 4.2. Resistencia a la meteorización de algunos sulfuros (Gobierno de Chile, 2002).

Mineralogía	Tamaño	Resistencia
Pirrotita Calcosina Galena Esfalerita	Fino	Baja
Pirita Enargita Marcasita Calcopirita	Medio	
Molibdenita	Grueso	

4.6 Normativa

La legislación en México referida a los residuos peligrosos está sustentada en las Normas Oficiales que a continuación se mencionan:

- NOM-052-SEMARNAT-2005, Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.
- NOM-141-SEMARNAT-2003, Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales.
- NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.
- NOM-155-SEMARNAT-2007, Que establece los requisitos de protección ambiental para los sistemas de lixiviación de minerales de oro y plata.
- NOM-157-SEMARNAT-2009, Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros.
- Asimismo, el muestreo y el análisis en laboratorio para determinar su caracterización están sustentados en las Normas Mexicanas que a continuación se mencionan:
- NMX-AA-132-SCFI-2006, que lleva por título “Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra”.
- NMX-B-021-1982. Determinación de las Formas de Azufre en el Carbón. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Norma mexicana. Dirección General de Normas.
- NMX-B-400-1970. Método de análisis químico para la determinación gravimétrica de azufre en minerales de fierro. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Norma mexicana. Dirección General de Normas.

- EPA. 1986. Method 9038 Sulfate (Turbidimetric), Environmental Protection Agency. Washington, DC. EEUU.

4.7 Estudios geológicos

En la Universidad Politécnica de Cataluña cuando se realiza un estudio de residuos mineros para conocer el potencial de generación de drenaje ácido se sigue una metodología que consta de 3 etapas para clasificar a los residuos mineros, dichas etapas consisten en análisis de textura de la roca, análisis geoquímico y análisis mineralógico de los residuos mineros después del proceso de beneficio (Figura 4.6).

La primera etapa consiste en caracterizar de manera general la muestra, así como en clasificar la roca mediante un índice de textura, antes del proceso de beneficio, con la finalidad de evaluar en forma preliminar el contenido de sulfuros, así como de materiales que puedan neutralizar la generación de drenaje ácido, como la calcita, y una prueba estática llamada pH en pasta. La segunda etapa implica el uso de pruebas geoquímicas estáticas con el fin de realizar comprobaciones de la clasificación y caracterización inicial, así como para cuantificar el potencial de formación de ácido y el potencial de neutralización. En la etapa final, a partir de pruebas geoquímicas cinéticas y herramientas de microanálisis se comparan los resultados de las etapas anteriores, y se hace la caracterización detallada del estado de los sulfuros formadores de ácido.

Este procedimiento conlleva la realización de análisis geoquímico, mineralógico y de textura de la roca simultáneamente, que permitan una caracterización general de la muestra, así como determinar la presencia de minerales oxidables y minerales neutralizadores de una posible generación de acidez.

Dicha metodología (Parbhakar-Fox, 2011) inicia con el cálculo del índice de drenaje ácido de roca o ARDI por sus siglas en inglés (Acid Rock Drainage Index), que se basa en una evaluación de la textura de la roca intacta (antes del proceso de beneficio), conformado por ciertos parámetros que intervienen directamente con la formación de drenaje ácido.

Para determinar el índice de textura de la roca, se consideran cinco parámetros (A-D), que se determinarán a una macro-escala y en una micro-escala otorgando una calificación a cada parámetro, del A al C se califican con un valor de 0-10 y los parámetros D y E se califican con un valor de 5-10.

El parámetro A llamado contenido de sulfuros es un indicador del potencial máximo de acidez y requiere estimar el contenido de sulfuros de hierro. Para una evaluación de macro-escala, selecciona un área de 3cm por 3cm y en la micro-escala se evalúa toda la sección pequeña. Cuanto mayor sea el contenido de sulfuro, mayor será el potencial de formación de ácido; se calcula como azufre en forma de sulfuro o como la cantidad de azufre total. Si se le da una puntuación de 0 (es decir, no hay sulfuros presentes), entonces no se requiere una evaluación adicional y la muestra se considera como no generadora de drenaje ácido.

El parámetro B, denominado alteración de sulfuros, es un indicador de la oxidación de estos compuestos en la roca, se califican como 10 los sulfuros inalterados, una puntuación de 5 a los sulfuros parcialmente alterados y a los altamente oxidados se les da una puntuación baja.

El parámetro C, llamado morfología de los sulfuros, evalúa el área superficial disponible para la oxidación del sulfuro basado sólo en la observación (es decir, sin mediciones detalladas). En general, en la macro-escala, un sulfuro disperso en la roca se califica con puntuaciones altas y una

concentración de sulfuros se otorga con calificaciones bajas. Entre mayor sea la superficie disponible para oxidación, mayor calificación obtendrá.

El parámetro D, contenido de minerales neutralizadores de acidez, evalúa la cantidad de minerales que pueden neutralizar directamente a los minerales generadores de ácido. Si los minerales formadores de ácido están rodeados de minerales neutralizantes, entonces la calificación es de 0 (por ejemplo, si la pirita se encuentra al 100% rodeada de cuarzo).

El parámetro E, llamado relación espacial de los sulfuros y los minerales neutralizadores, evalúa si los sulfuros de hierro presentes en la roca se encuentran en contacto directo con otros tipos de sulfuros (como pirita en contacto con arsenopirita), de ser así, se asigna una puntuación alta. Cuanto menor sea el porcentaje de contacto, menor será la puntuación. Si los sulfuros se encuentran directamente en contacto con los minerales neutralizantes, la puntuación mínima a asignar es de 5. Si la posible formación de ácido está totalmente delimitada por un mineral inerte (por ejemplo cuarzo) se asigna un valor de 0.

La Figura 4.5 muestra ejemplos de las evaluaciones del Índice de drenaje ácido de roca.

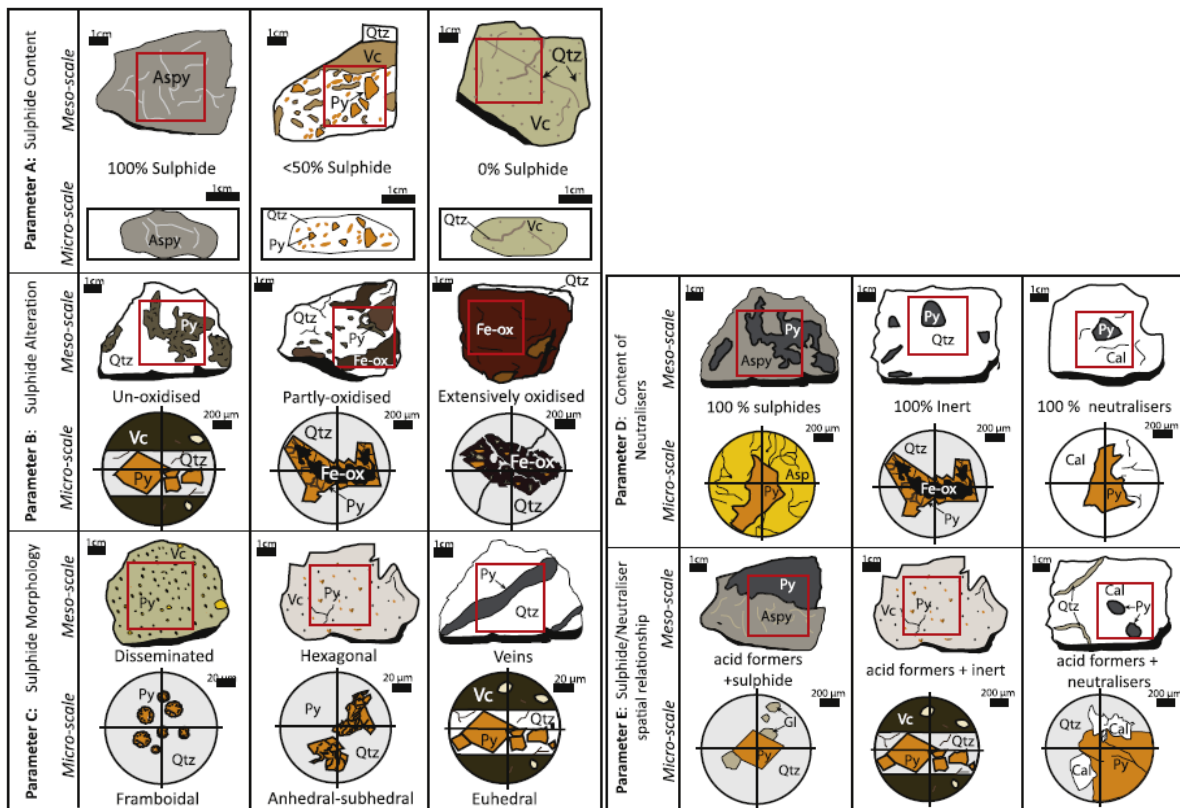


Figura 4.5. Parámetros a evaluar para la obtención del índice de drenaje ácido de roca. ASPY: arsenopirita; Qtz: cuarzo; Vc: roca volcánica, Py: pirita; Fe-ox: Óxidos de hierro; Cal: calcita; GI: galena; PAF: potencialmente generadores de ácido; NAF: no formadores de ácido; ANC: capacidad de neutralización de ácido (Parbhakar-Fox, 2011).

La Figura 4.6 presenta la metodología utilizada en la Universidad Politécnica de Cataluña, España:

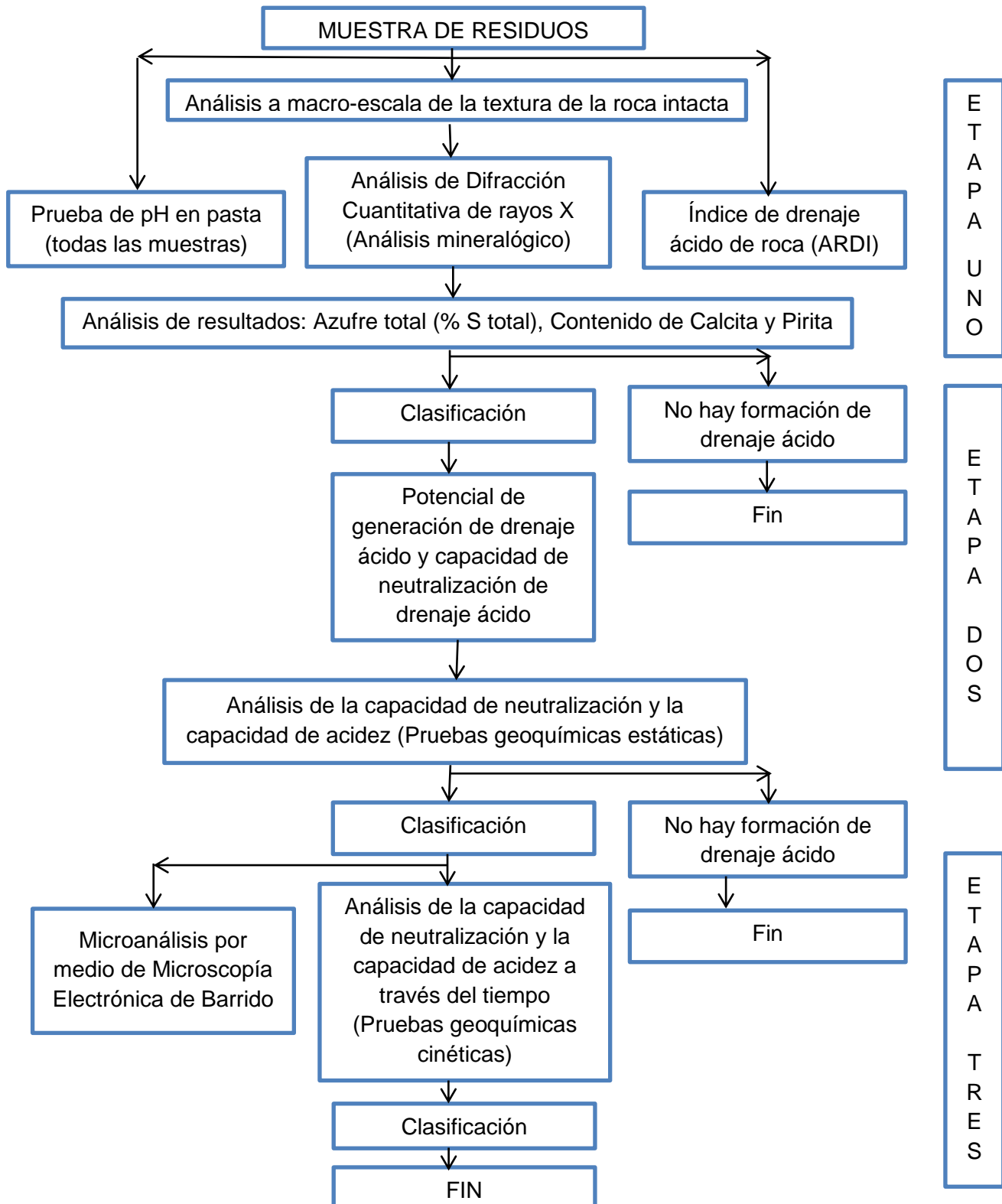


Figura 4.6. Diagrama de flujo de la metodología para la estimación de drenaje ácido en muestras de residuos mineros utilizada en la Universidad Politécnica de Cataluña, Manresa, España (Modificado de Parbhakar-Fox, 2011).

4.8 Modelado geoquímico

La generación de drenaje ácido es un problema de responsabilidad social, ambiental y económico que la industria minera enfrenta, su ocurrencia puede tomar años o décadas, y puede continuar durante siglos (Lottermoser, 2007; Maest et al., 2005).

El modelado geoquímico es una herramienta útil que permite una evaluación de los residuos para poder determinar si presentan propiedades que potencialicen la generación de acidez, o bien, no se clasifican como generadores de ácido. Para predecir la generación de drenaje ácido en los residuos mineros existen dos tipos de pruebas de laboratorio: estáticas y cinéticas.

4.8.1 Pruebas estáticas

Son pruebas del tipo predictivo del potencial para la producción de DAM de los jales, en el futuro. Los resultados de las pruebas estáticas permiten estimar el balance entre los minerales potencialmente generadores de ácido y aquellos potencialmente consumidores de ácido en una muestra.

Estas pruebas se conducen de manera simple, rápida y con costos relativamente bajos. Las pruebas estáticas son útiles sólo para predicciones cualitativas del potencial DAM. El procedimiento más utilizado para estimar el balance entre los minerales productores de acidez y los neutralizadores es el propuesto por Lawrence (1990, 1997), denominado "Prueba Modificada de Balance Ácido-Base (PM-ABA)", que consiste en determinar en las muestras de jales los siguientes parámetros: (Flores, 2013):

- a) El Potencial de Neutralización (PN), que está dado por la presencia de minerales que contienen carbonatos.
- b) El Potencial de Acidez (PA), que está dado por la presencia de minerales que contienen azufre.

Estas pruebas permiten determinar el comportamiento geoquímico de las muestras a analizar.

Las pruebas estáticas son aplicables a jales que aún no se encuentran en proceso de oxidación, pues son de tipo predictivo, es decir, a través de estas pruebas se pronostica la factibilidad de que los residuos sean generadores de drenaje ácido a partir del análisis de las muestras. Las pruebas estáticas son relativamente de bajo costo y rápidas (usualmente tardan horas o días).

Las pruebas estáticas pueden usarse con el fin de caracterizar las diferentes muestras y a partir de los resultados elegir las que se someterán a las pruebas cinéticas (Lappako, 2002).

Existe una prueba llamada pH en pasta, utilizada en la Universidad Politécnica de Catalunya, en Manresa, España. Dicha prueba permite conocer el estado de oxidación de los sulfuros metálicos contenidos en las muestras, consiste en colocar en vasos de precipitados una relación 1:3 de muestra y agua destilada respectivamente, con agitación constante, realizando mediciones de pH en la mezcla de jal y agua destilada en determinados tiempos.

La prueba de pH en pasta se realiza como predictiva una vez realizado los estudios geológicos previos.

En la Tabla 4.1 se presenta una comparación de las pruebas estáticas más comunes.

Tabla 4.3. Resumen de algunas Pruebas Estáticas (Lapakko 1993; US EPA, 1994; Maest et al, 2005).

Balance Ácido-Base (ABA) (Sobek et al, 1978)	Prueba Modificada Balance Ácido-Base (PM-ABA) (Coastech, 1989)	Colombia Británica Investigación Inicial (Duncan and Bruynesteyn, 1979)	Potencial de Producción Alcalina: Relación de Azufre (Caruccio et al, 1981)	Producción Neta de Ácido (Coastech, 1989)
Determinación de la producción de acidez				
Potencial de Producción de Acidez (PPA)=31.25*Stotal	PPA=31.25*(Stotal-Ssulfato)	Producción de acidez total=31.25*Stotal	S total es usado como indicador	Agregar a 5g de muestra 300ml H ₂ O ₂ para oxidar los sulfuros presentes
Determinación del potencial de neutralización				
Secar la muestra pulverizada a menos 60 mallas; agregar HCl conforme a la prueba de efervescencia; titular hasta pH=7.0	Secar la muestra pulverizada a menos 200 mallas; agregar HCl conforme a la prueba de efervescencia; agitar durante 23hr; después de 6hr de agitación se requiere un pH de entre 1.4 y 2.0; titular hasta pH=8.3	Secar la muestra pulverizada a menos 300 mallas; titular la muestra con H ₂ SO ₃ 1.0N hasta pH=3.4	Secar la muestra pulverizada a menos 0.023mm mallas; agregar 20ml de HCl 1.0N a 0.4g de sólido durante dos horas; titular hasta pH=4.0	El ácido producido por la oxidación de los sulfuros de hierro disolverá los minerales; titular hasta un pH=7.0
Características				
Simple y de poca duración. Puede sobre o subestimar el potencial de generación de acidez y sobre estimar el PN.	Mayor duración que ABA. Previene la sobre estimación de PN y PA.	Requiere más equipo y dura más que ABA. Si el potencial de producción de acidez y el PN son cercanos se complica la interpretación.	Simple, no requiere de equipo especial.	En muestras altamente sulfurosas las temperaturas elevadas pueden disminuir el pH.

4.8.1.1 Prueba estática de balance ácido-base

Prueba Modificada Balance Ácido-Base (PM-ABA)

La Prueba Modificada Balance Ácido-Base (PM-ABA) es similar al método anterior, pero como su nombre lo indica, con algunas modificaciones. A diferencia de la prueba ABA, en esta se calcula el PPA considerando (restando) el contenido de azufre en forma de sulfatos (Lawrence, 1990). La determinación del PN requiere mayor tiempo, 24hr de digestión del ácido a temperatura ambiente, en

lugar de hervirlo con ácido clorhídrico. La titulación para determinar el ácido consumido en la digestión, con hidróxido de sodio, se realiza hasta alcanzar un pH de 8.3 en lugar de 7.0.

La prueba modificada asume que el azufre presente en la muestra como sulfato no es productor de acidez, por lo que puede subestimar el potencial de acidez si la jarosita u otros minerales de sulfato productores de ácido se encuentran presentes. Realizar la digestión del ácido a temperatura ambiente puede reducir la contribución de los minerales de carbonato de hierro cuando se determina el potencial de neutralización (US EPA, 1994).

La norma oficial mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, que establece el procedimiento para caracterizar los jales, indica el procedimiento para estimar si los jales son generadores de ácido mediante el método de Prueba Modificada de Balance Ácido Base, que a su vez se apoya en Normas Mexicanas.

En la Figura 4.7 se muestra un diagrama de flujo del procedimiento de la Prueba Modificada de Balance Ácido Base.

En la Figura 4.8 se presenta un diagrama de flujo del procedimiento de la determinación de azufre total de acuerdo a la NMX-B-400-1970, mientras que en la Figura 4.9 se muestra un diagrama de flujo del procedimiento para la extracción de los sulfatos de acuerdo a la NMX-B-021-1982. Por su parte, la Figura 4.10 presenta un diagrama de flujo del procedimiento de cuantificación de sulfatos por el método turbidimétrico EPA-9038.

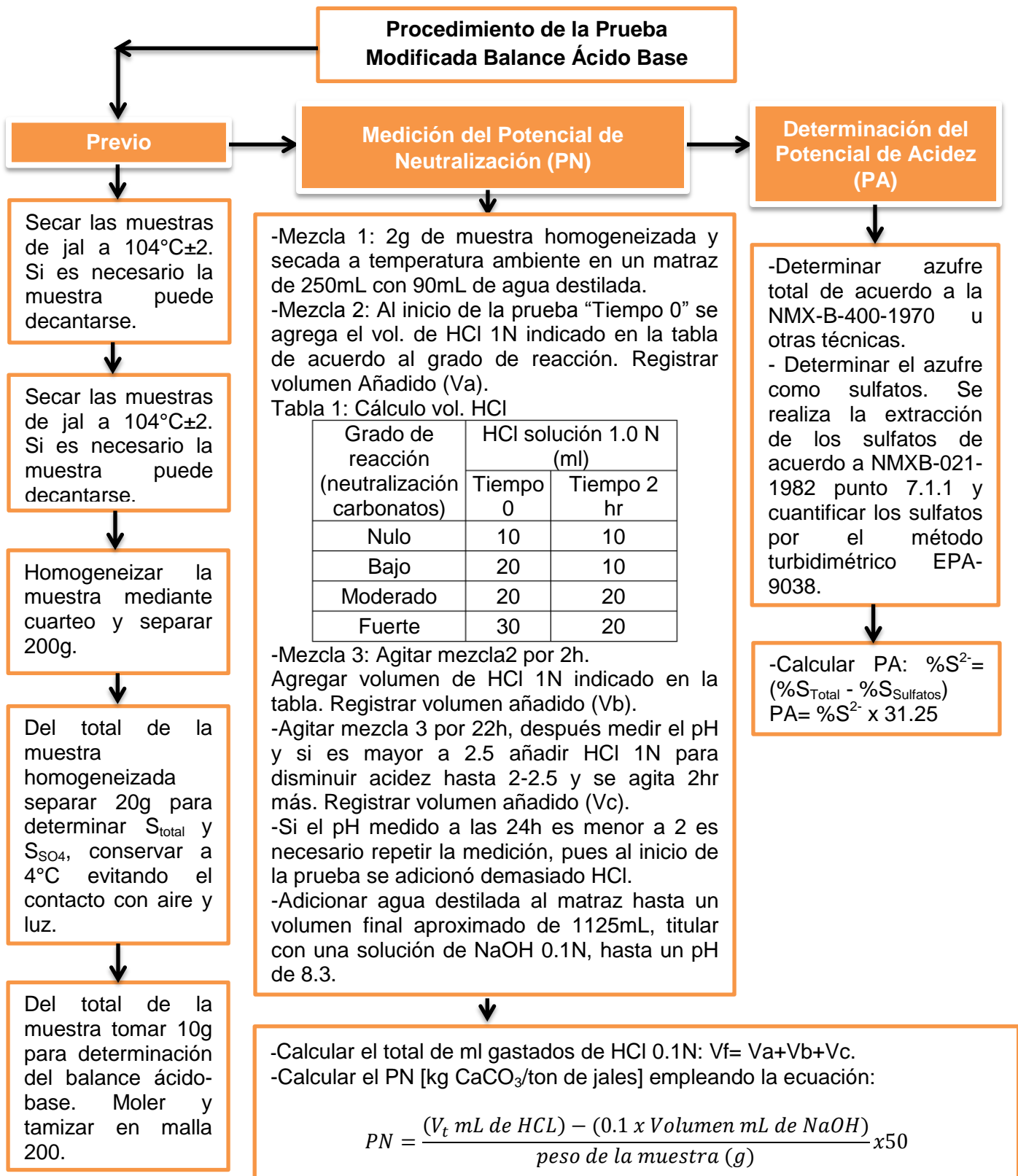


Figura 4.7. Diagrama de flujo del procedimiento de la Prueba Modificada de Balance Ácido Base (Flores, 2013).

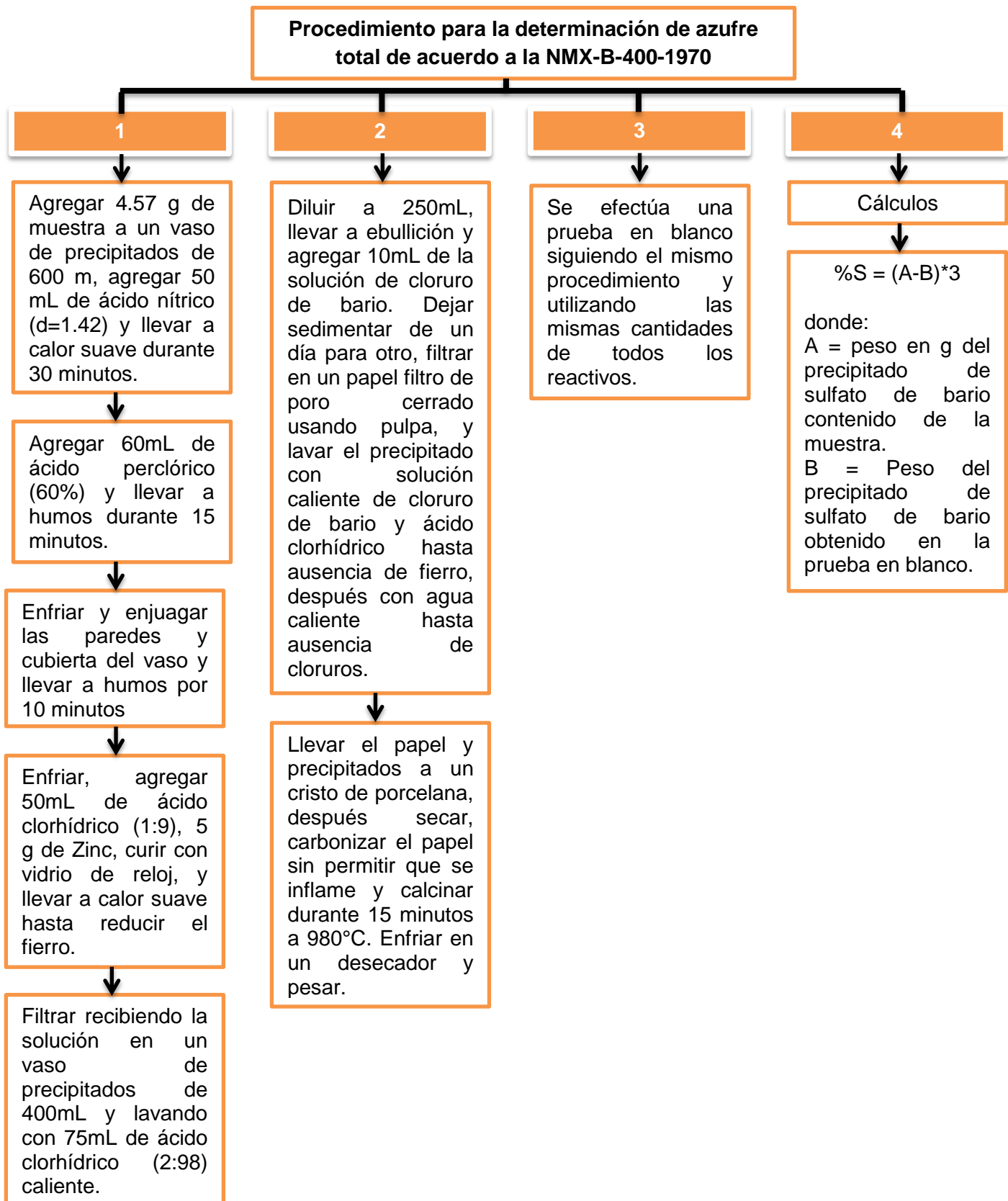


Figura 4.8. Diagrama de flujo del procedimiento para determinación de azufre total de acuerdo a la NMX-B-400-1970 (Flores, 2013).

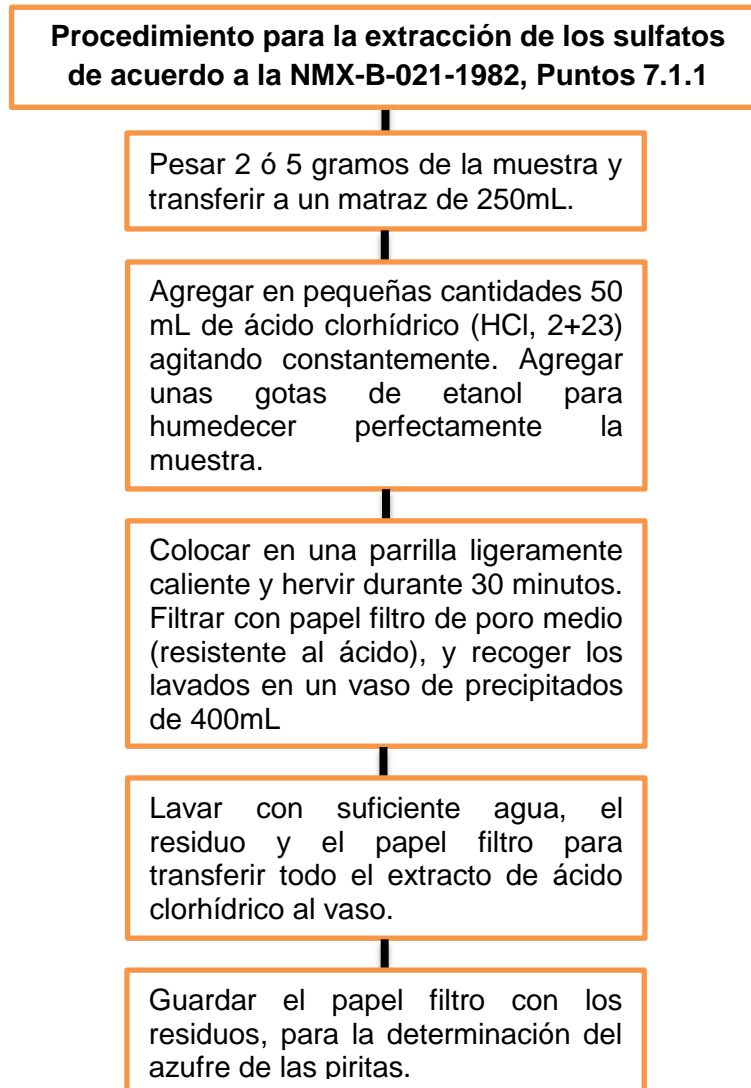


Figura 4.9. Diagrama de flujo del procedimiento para la extracción de los sulfatos de acuerdo a la NMX-B-021-1982 (Flores, 2013).

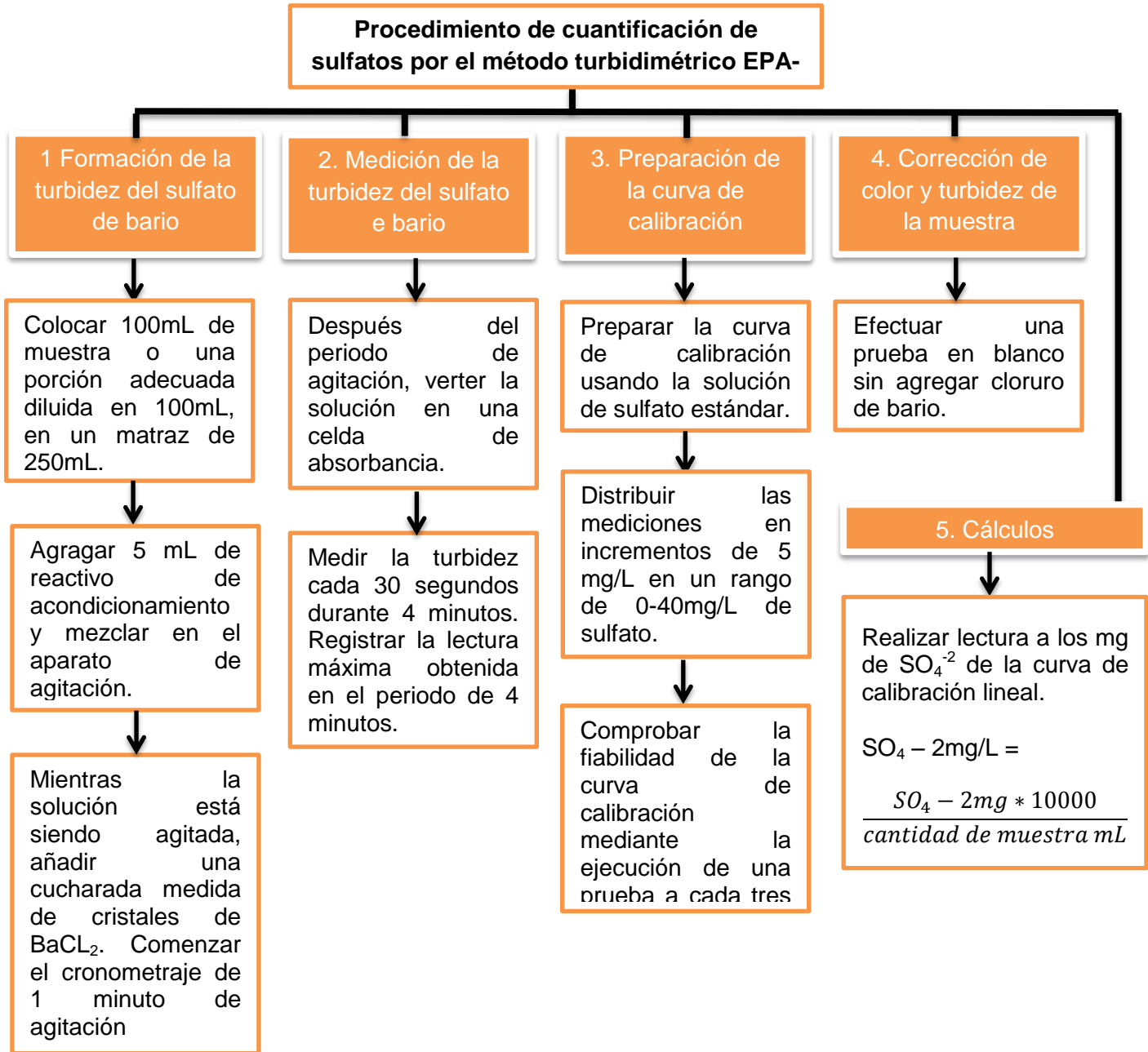


Figura 4.10. Diagrama de flujo del procedimiento de cuantificación de sulfatos por el método turbidimétrico EPA-9038 (Flores, 2013).

4.8.2 Pruebas cinéticas

Las pruebas cinéticas consisten en someter a intemperismo acelerado a las muestras, bajo condiciones controladas de laboratorio. Una de las pruebas cinéticas más utilizadas es la prueba de celdas húmedas, que está diseñada para simular los procesos de intemperismo geoquímico bajo condiciones de oxidación óptimas. (Flores, 2013). Estas pruebas permiten determinar el comportamiento geoquímico de los residuos mineros a través del tiempo.

El principio básico de las pruebas cinéticas es exponer las muestras a condiciones controladas en el laboratorio de tal forma que se les someta a un intemperismo acelerado, es decir, a una velocidad mayor a la que se presentaría en campo. Esto tiene la ventaja de reducir el tiempo y poder observar oportunamente la capacidad de generación de acidez de los residuos. A partir de los resultados, en caso de ser necesario, se pueden implementar medidas de prevención y/o control para evitar afectaciones al medio ambiente. En este último caso, las pruebas pueden inclusive ser empleadas para probar técnicas de control/tratamiento, p. ej., agregando minerales consumidores de acidez para aumentar la alcalinidad (GAMDAM, 2014; US EPA, 1994).

La NOM-157-SEMARNAT-2009 establece en su anexo normativo 2 el método estándar de prueba para la intemperización acelerada de materiales sólidos utilizando una celda húmeda modificada. Este método de prueba es realizado en cada muestra en una celda cilíndrica. Este procedimiento de prueba requiere de ciclos semanales compuestos de tres días de aire seco (menos de 10% de humedad relativa) y tres días de aire saturado de agua (aproximadamente 95% de humedad relativa) bombeado a través de la muestra, seguido de una lixiviación con agua en el séptimo día. Recomienda una duración de 20 semanas.

Tabla 4.4. Resumen de algunas Pruebas Cinéticas (Lapakko 1993; US EPA, 1994; Maest et al, 2005).

CELDA DE HUMEDAD (Sobek, et al., 1978)	EXTRACCIÓN SOXHLET (Singleton and Lavkulich, 1978; Sullivan and Sobek, 1982)	PRUEBA DE COLUMNAS (Bruynesteyn and Hacnl, 1982; Hood and Oertel, 1984)
RESUMEN DEL MÉTODO DE PRUEBA		
El tamaño de partícula es de 2.38 mm, una porción de 200g de roca se expone a tres días aire seco, tres días aire humidificado, y se aclara con 200mL en el día siete.	Tamaño de partícula no presente temperaturas de trabajo de T=70°C (Singleton y Lavkulich, 1978) y T=25°C (Sullivan y Sobek, 1982). El agua pasa a través de la muestra, se destila y se recicla a través de la muestra nuevamente.	El tamaño de la partícula es variable, las columnas que contienen desechos de la mina generan lixivios de volúmenes discretos.
VENTAJAS Y DESVENTAJAS		
Ventajas: Modelos Potencial de Acidez y Potencial de Neutralización son representativos y los modelos en el los ciclos de aire húmedo y seco se aproxima a las condiciones de campo y la tasa de acidez por unidad de muestra. Desventajas: Los resultados tardan mucho tiempo, se utilizan algunos equipos especiales, moderada facilidad de interpretación amplia de los datos generados.	Ventajas: Prueba simple, resultados de la evaluación de la interacción entre el Potencial de Acidez y el Potencial Neutralizador en poco tiempo. Desventajas: Necesidad de equipo especial, moderada interpretación en la etapa de desarrollo y su relación con los procesos naturales no son claros en cuanto a la simulación del intemperismo en las muestras.	Ventajas: Utilización de modelos de Potencial de Acidez y Potencial de Neutralización, ciclos de aire húmedo y seco, modelos con diferentes tamaños de partícula. Desventajas: Es de difícil interpretación, no es práctico para un gran número de muestras y que además sean de gran volumen, se requiere mucho tiempo para la obtención de resultados, y existen problemas potenciales, como la aplicación del ciclo de aire de forma desigual en todas las muestras.

Continuación de la Tabla 4.2. Resumen de algunas Pruebas Cinéticas (Lapakko 1993; US EPA, 1994; Maest et al, 2005)

<p>CONFIRMACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN COLUMBIA BRITÁNICA (Duncan and Walden, 1975)</p>	<p>REACTOR DISCONTINUO (Halbert et a., 1983)</p>	<p>PRUEBAS DE CAMPO (Edger and Lapakko, 1985)</p>
<p>RESUMEN DEL MÉTODO DE PRUEBA</p>		
<p>El tamaño de partícula es menor a la malla 400, presentando una porción de 15-30 g de muestra. Se añade a la solución bacterias activas a un pH de 2.2 a 2.5 a una temperatura de 35°C, si el pH aumenta, la muestra no es productora de drenaje ácido, si el pH disminuye, se añade una proporción de la masa original de la muestra en cada uno de dos incrementos.</p>	<p>El tamaño de partícula es menor a la malla 200. La muestra se mezcla con agua y se agita en una proporción 200 g/500 mL respectivamente.</p>	<p>Escala de partículas de campo de 800 a 1300 toneladas métricas. Prueba con pilotes construidos en el flujo de la muestra a analizar, requiere información de los datos de la calidad de agua.</p> <p>Las pruebas comenzaron en 1977 y están en curso.</p>
<p>VENTAJAS Y DESVENTAJAS</p>		
<p>Ventajas: Fácil de usar, de bajo costo, evalúa potencial de lixiviación biológica.</p> <p>Desventajas: Requiere mucho tiempo necesario para la obtención de resultados, requiere algunos equipos especiales, la interpretación de resultados es complicada si el cambio de pH es pequeño, se requiere un tiempo elevado para que el pH se estabilice.</p>	<p>Ventajas: Capaz de examinar muchas muestras simultáneamente y el equipo utilizado es relativamente sencillo.</p> <p>Desventajas: Está sujeta a grandes errores de muestreo y falta de precisión.</p>	<p>Ventajas: Utiliza desechos de la mina real bajo condiciones ambientales. Se puede utilizar para determinar los métodos de mitigación de acuerdo al volumen de drenaje ácido obtenido.</p> <p>Desventajas: La construcción inicial es de un costo elevado y requiere mucho tiempo para su realización.</p>

4.8.2.1 Pruebas cinéticas en celdas de humedad

La reacción de las muestras de residuos mineros que se presenta con el intemperismo del sitio, se puede evaluar a través de pruebas cinéticas, como son las celdas de humedad, propuestas por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales o por sus siglas en inglés ASTM en su método D 5744 07 y por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América o por sus siglas en inglés EPA en su método 1627.

En la presente tesis se combinaron los esquemas de la ASTM y de la EPA para la fabricación de las celdas. La combinación de ambos esquemas fue seleccionada por la importancia que presenta el dióxido de carbono en la oxidación de los residuos mineros, considerado en el método de la EPA y que dicho CO₂ está presente en la realidad. Resultando tubos de acrílico transparente de 10cm de diámetro por 20cm de alto, conteniendo 300g del jal, que se sostiene por un doble fondo también de acrílico transparente con perforaciones para el paso del lixiviado. Encima de dicho doble fondo se tiene

un papel filtro de poro cerrado ($< 2\mu\text{m}$) y una fibra para lavar trastos con el fin de evitar el paso del mineral al lixiviado (Figura 4.11).

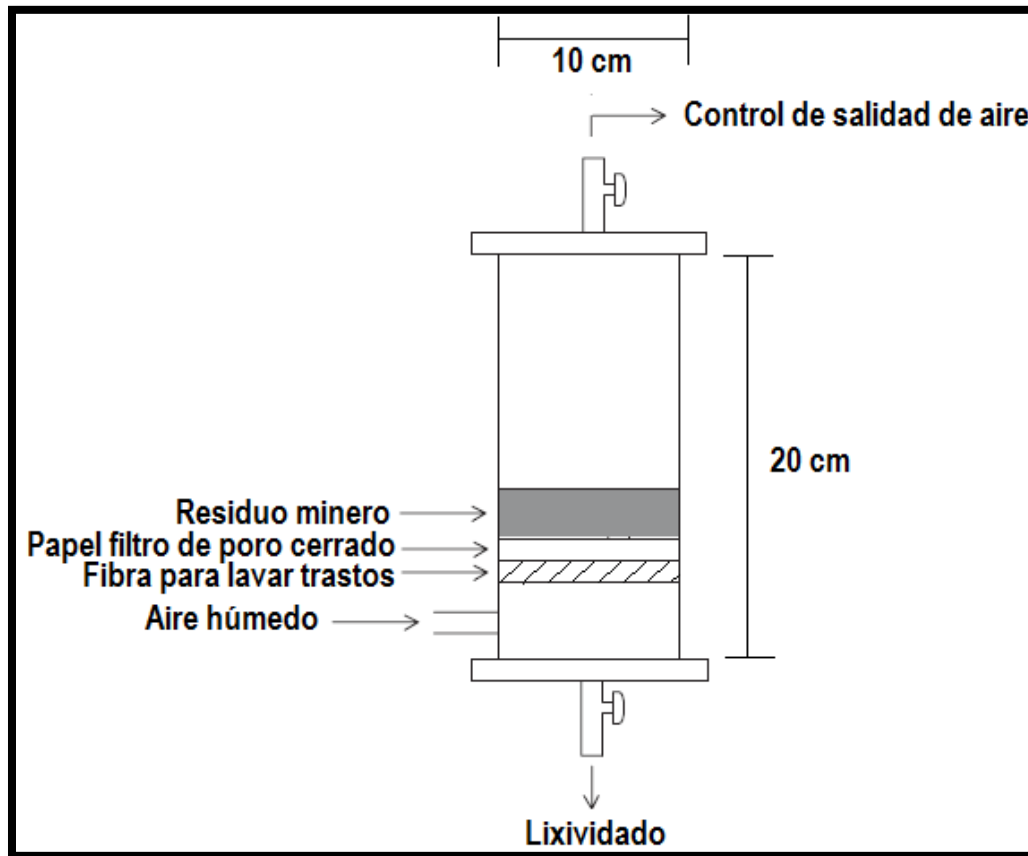


Figura 4.11. Diagrama de las celdas de humedad.

El procedimiento consiste en realizar ciclos semanales compuestos de tres días de aire seco y tres días de aire húmedo bombeado a través de las muestras, ambos con la introducción de dióxido de carbono, que pretenden simular el intemperismo acelerado del sitio durante un periodo de 20 semanas. Se efectúan lavados cada siete días para producir un lixiviado del cual se obtienen varios parámetros como son: pH, conductividad eléctrica y alcalinidad.

La introducción de aire húmedo se realiza empleando bombas para pecera con una capacidad de 2 L/min, con la finalidad de garantizar las condiciones que propone la EPA en su Método 1627, al establecer la relación de aire y dióxido de carbono de 1 a 9, o bien, suministro de 1 a 10 L/min de aire húmedo, a su vez las bombas están conectadas mediante manguera de silicón para pecera, a un matraz Erlenmeyer de 1 L con tapa de goma con cuatro perforaciones, dos para la introducción de aire de las bombas y dos para la salida del aire húmedo hacia las celdas, donde al final de la manguera se coloca un difusor para burbujear la mezcla de aire- CO_2 al agua destilada contenida en el matraz y así humedecer el aire de salida.

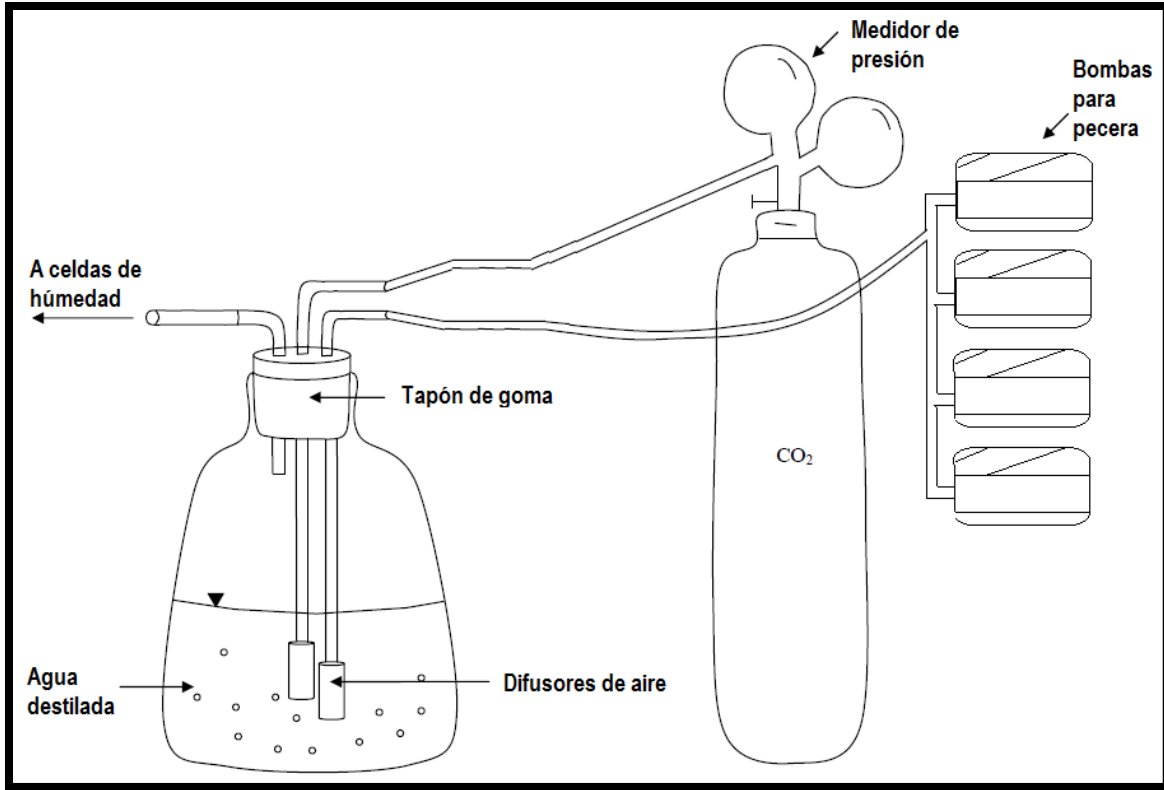


Figura 4.12. Diagrama del arreglo del sistema humidificado. Fuente: modificado de EPA, 2007.

5. Metodología del estudio

Se describe la secuencia de actividades realizadas de la investigación.

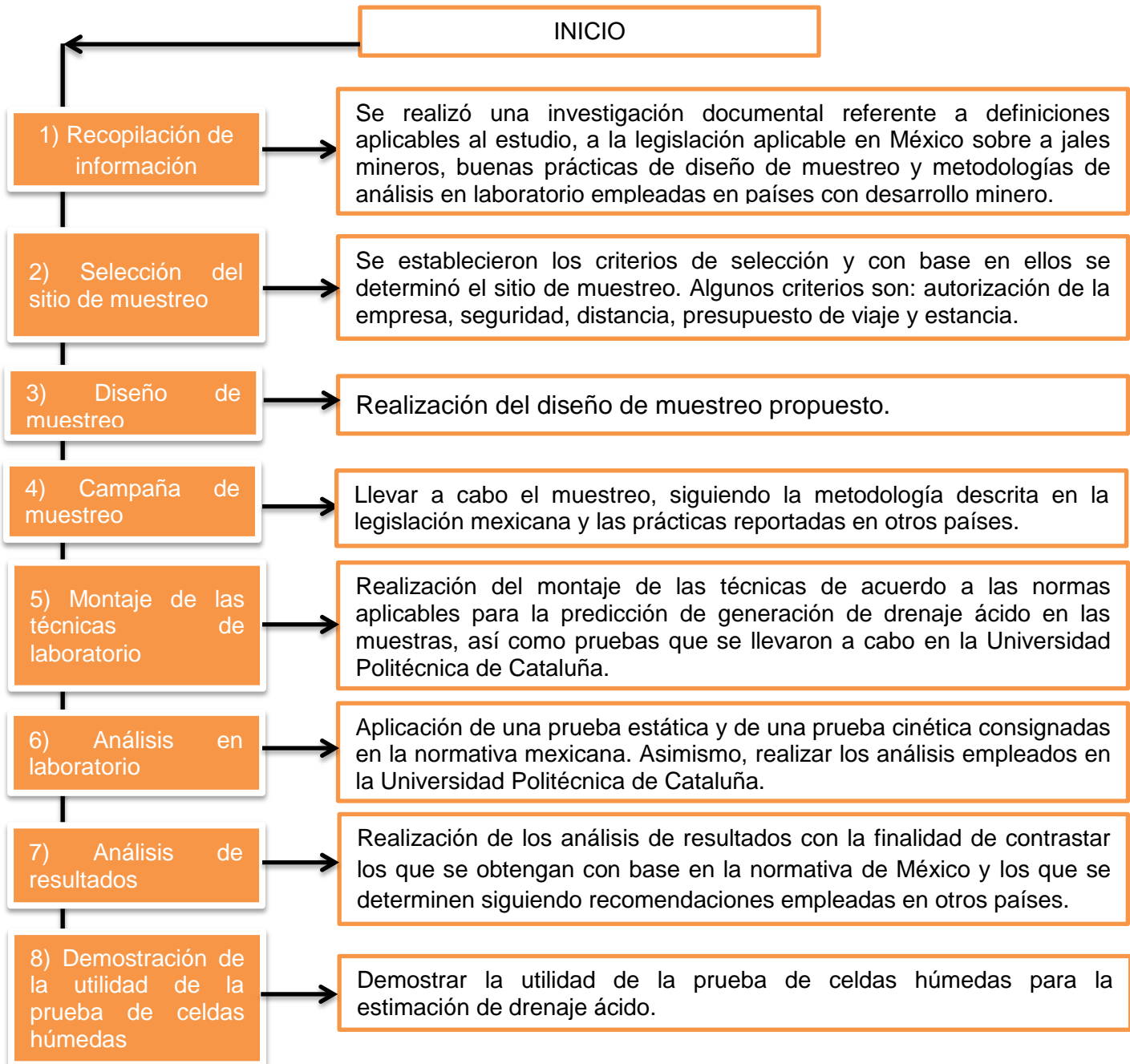


Figura 5.1. Diagrama de flujo de la metodología del estudio.

5.1 Recopilación de la información

Se realizó una investigación documental que incluyó las definiciones y conceptos aplicables al tema, a la legislación mexicana referente a jales mineros, buenas prácticas de diseño de muestreo y metodologías de análisis en laboratorio empleadas en países con desarrollo minero, que a su vez fueron recopiladas y se analizó para determinar la metodología que se utilizó en el estudio.

Se consideraron las prácticas de diseño de muestreo de Estados Unidos, Canadá, Australia y España; después de analizarlas, se decidió tomar como base el diseño que plantea Canadá en el Manual de predicción para drenaje químico de materiales geológicos sulfurados (William, 2009), (Anexo B y C).

Se llevó a cabo una estancia académica en la Universidad Politécnica de Catalunya en Barcelona, España, con la finalidad de investigar la metodología de muestreo y análisis en laboratorio de muestras de residuos mineros para estimar la generación de drenaje ácido.

5.2 Selección del sitio de muestreo

El área del predio de la Compañía Minera y Beneficiadora Purísima, S de R. L. es de 12 hectáreas, de las cuales 10 están destinadas a las presas de jales, una a la planta de beneficio y una a oficinas. En las 10 hectáreas destinadas a las presas de jales, 5 presas actualmente se encuentran en operación.

Se realizó una primera visita de reconocimiento a los terrenos de la empresa con la finalidad de conocer tanto su planta y proceso de beneficio, como la disposición de los residuos mineros en las presas de jales y su operación.

El ingeniero responsable de la operación de la planta beneficiadora, explicó el proceso de beneficio y el funcionamiento de las instalaciones durante un recorrido, que finalizó en las presas de jales.

La empresa minera autorizó el muestreo y se procuró que fuera lo más representativo posible, debido a ello se consideraron cuatro de las cinco presas de jales que existen en la empresa para la toma de dichas muestras, pues en la que no se pudo tomar muestra alguna fue la que en su momento se encontraba en operación, ya que por motivos de seguridad, y por contener los jales con un alto contenido de humedad no fue posible ingresar.

En la Figura 5.2 se muestra la localización de la empresa, así como sus oficinas, la planta de beneficio y las presas de jales con las que cuenta.

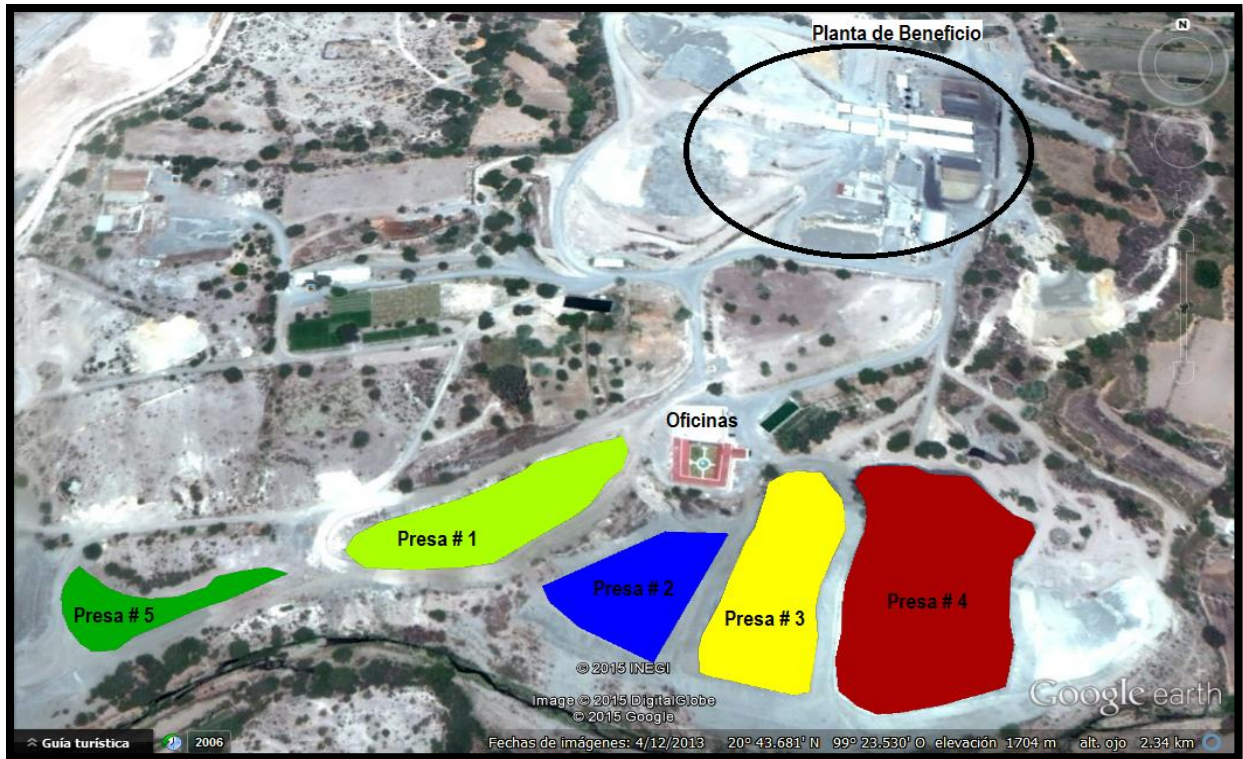


Figura 5.2. Localización de la empresa, oficinas, planta de beneficio y las presas de jales con las que cuenta (Google Earth, 2015).

5.3 Diseño de muestreo

De acuerdo a la legislación mexicana, la NOM-157-SEMARNAT-2009 establece que las muestras deben ser obtenidas durante la operación, de las corrientes donde se generan los residuos o directamente de los depósitos de residuos, obteniendo un compósito anual.

Asimismo, la NOM-141-SEMARNAT-2003 establece que para evaluar muestras provenientes de la operación diaria de la planta de beneficio actual de la unidad minera, la información requerida será obtenida del muestreo continuo de la descarga de la planta de beneficio en la cantidad necesaria para formar un compósito y el número de muestras se calculará en función de sus reservas minerales en toneladas.

En virtud de lo anterior, al solicitar un compósito anual de la descarga y a falta de un criterio claro y objetivo en la normativa aplicable del muestreo de jales distribuidos en la presa, se considera el muestreo como no representativo de los jales almacenados al momento del muestreo.

Por lo tanto, con la finalidad de obtener muestras representativas del jal dispuesto en las presas de jales se recomienda seguir el procedimiento descrito en la norma técnica complementaria NMX-AA-132-SCFI-2006 titulada "Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra" (Anexo A).

El diseño de muestreo del presente estudio se realizó de acuerdo a la NMX-AA-132-SCFI-2006. Dicha norma establece las especificaciones generales para el muestreo de suelos cuyo contenido de metales y metaloides requiere ser identificado y cuantificado en el sitio en estudio.

Una vez reconocido el sitio, para determinar el tipo de muestreo se consideró que la forma más representativa de determinar la composición de los residuos mineros era por medio de muestras superficiales y verticales.

Dado lo anterior, se consideró el diseño de muestreo para una presa de jales (presa número 2) debido a lo acordado con la empresa minera, pues al momento de realizar la primer visita, el ingeniero a cargo de la operación de la planta sugirió realizar el muestreo únicamente en una presa, ya que las demás se encontraban en operación y existe riesgo en la toma de muestras en dichas presas debido al contenido de agua en ellas.

Estudiando el área de muestreo aprobada por la empresa, se decidió tomar en cuenta sólo la parte del bordo de dicha presa de jales, siendo ésta la parte más estable y que no implicaría un riesgo en la toma de muestras.

Es pertinente mencionar que la determinación del número de muestras se consideró con la superficie total de la presa de jales.

Mediante el programa Google Earth, se determinaron las coordenadas geográficas de la presa de jales, así como el bordo de dicha presa, posteriormente se dibujó un polígono del área a muestrear como se muestra en la Figura 5.3.



Figura 5.3. Polígono considerado en el bordo de la presa de jales para la toma de muestra localizado en plano satelital.

A través de un software en línea (<http://www.freemaptools.com/area-calculator.htm>), se estimó el área real del polígono y la longitud del bordo.

Área del polígono = $456.453 \text{ m}^2 = 0.046 \text{ ha}$

De acuerdo a la Tabla 10.1 de muestreo exploratorio de la NMX-132-AA-2006 (Ver Anexo A), dado que el bordo presenta un área aproximada de 456.453 m^2 (0.046 ha), la Norma sugiere un número mínimo de 6 muestras y un pozo vertical. A su vez, se determinó el número de muestras considerando a la presa de jales número 2 por completo tomando en cuenta estos últimos resultados para la toma de muestras.

La Figura 5.4 muestra el polígono de la presa de jales número 2.

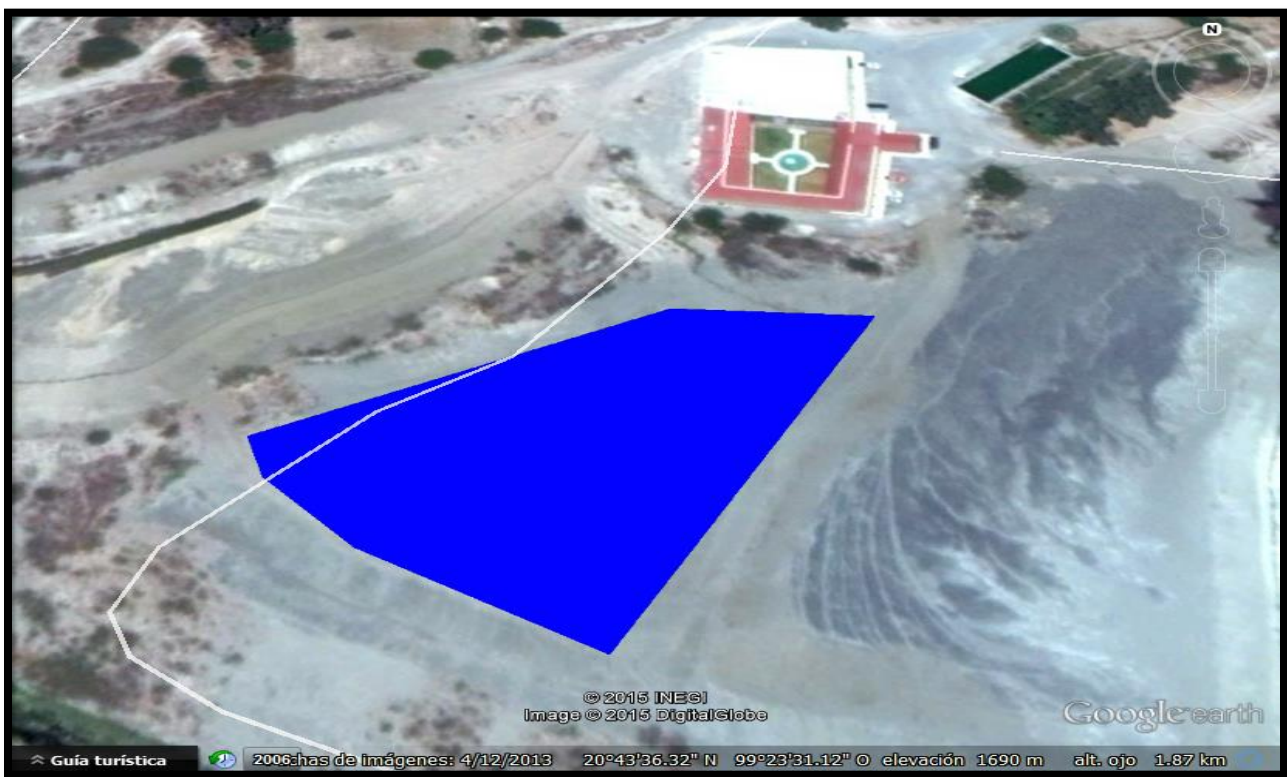


Figura 5.4. Polígono considerando la presa de jales número 2 completa para la toma de muestra localizado en el plano satelital.

Del software en línea se estimó el área del polígono:

Área del polígono = $5610.551 \text{ m}^2 = 0.561 \text{ Ha}$

De acuerdo a la Tabla 5.1 de muestreo exploratorio de la NMX-132-AA-2006 (Anexo A), dado que la presa de jales presenta un área aproximada de 5610.551 m^2 (0.561 ha), la Norma sugiere un número mínimo de 10 muestras y dos pozos verticales.

Por lo que con dicha consideración, se debería extraer un total de 10 muestras simples y 2 muestras de dos pozos verticales.

Una vez determinado el número de muestras y de acuerdo al área donde la empresa permite muestrear (superficie del bordo de contención) se propuso la cuadrícula mostrada en la Figura 5.5 para determinar la posición de los puntos de muestreo.

Se propuso dividir la superficie en 10 partes iguales de acuerdo al lado más largo y dividir en 3 partes iguales de acuerdo a su lado más corto y en los cruces de cada dos cuadros formados tomar las muestras superficiales y se decidió tomar las muestras verticales en el talud del bordo.

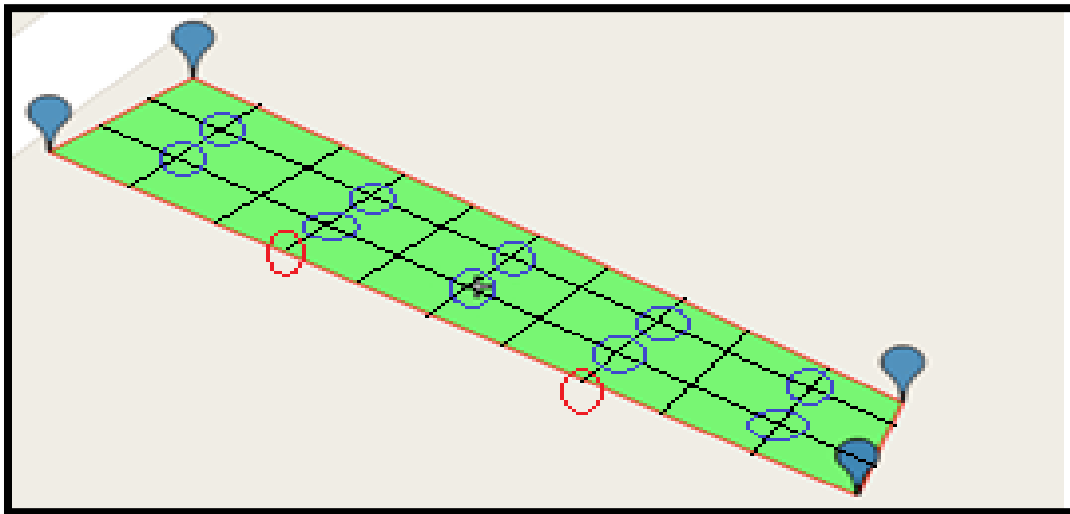


Figura 5.5. Cuadrícula propuesta para la toma de muestras en el bordo de la presa de jales.

El diseño de muestreo del presente estudio se apoyó en el Método 1627 de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos de América llamado “Método de prueba para la predicción de drenaje de minas”, el cual establece recomendaciones para la recolección, preservación y el manejo de las muestras.

Las muestras se deben almacenar completamente selladas, en recipiente de polietileno de alta densidad (HDPE), o algún otro recipiente hermético, en condiciones de oscuridad, seco, y fresco, hasta la llegada al laboratorio.

A continuación se listan los materiales y el equipo de protección personal requerido para la toma de muestras.

Lista de materiales y equipo necesario para realizar el muestreo:

I. Materiales

- a) 2 rollos papel calcomanía
- b) 2 rollos de cinta adhesiva gruesa transparente
- c) 13 recipientes de polietileno de alta densidad (HDPE)

- d) 4 plumones de tinta permanente color negro
- e) 2 cepillos o brochas
- f) 3 galones de agua purificada
- g) 2 rollos de aluminio grueso
- h) 2 espátulas de acero inoxidable
- i) 4 bolsas grandes color negro
- j) 1 bitácora para el registro de las muestras

II. Equipo de protección personal

- a) 5 pares de guantes
- b) 5 cubrebocas de concha o uso industrial
- c) 5 lentes de uso industrial
- d) 5 cascos

III. Equipo empleado durante el muestreo

- a) 1 cavahoyos
- b) 1 báscula
- c) 2 palas
- d) 1 GPS
- e) 1 fluxómetro
- f) 1 cinta métrica
- g) 2 cámaras fotográficas

5.3.1 Campaña de muestreo

Se realizó una segunda visita a la empresa minera con la finalidad de realizar la toma de muestras. La persona encargada de la operación mostró los lugares en donde se podía acceder para tomar las muestras en condiciones seguras.

Previo a la toma de muestras se decidió el recorrido y se determinaron las presas a las que se podían tener acceso. Al aprobar el muestreo en diferentes presas de jales se cambió el planteamiento inicial de los puntos de muestreo en virtud de que se presentó la oportunidad de obtener muestras en diferentes presas, lo cual se consideró más representativo de los residuos mineros, quedando una única presa en la que no se pudo acceder debido a las condiciones en las que se encontraba, ya que se hallaba en operación, y esto provocaba que el acceso fuera imposible por motivos de seguridad.

De un total de cinco presas de jales con las que cuenta la empresa, se pudo obtener muestras dentro del vaso de cuatro de éstas, extrayendo un total de 13 muestras, de cuatro sitios distintos y a diferentes profundidades.

Dado que el proceso constructivo de las presas de jales prevé la remoción del material deshidratado para elevar los bordos y así aumentar su capacidad, con los mismos residuos empleando un cargador frontal, se excavaron y removieron los residuos mineros, mezclando los residuos que fueron almacenados en otros tiempos, logrando con ello en cierta forma homogeneizar los residuos.

Se aprovechó el apoyo de maquinaria, la cual, como primer paso realiza una zanja alrededor de la presa de jales, de una profundidad aproximada de 3 metros, que había realizado días previos a la toma de muestras, dejando accesible el perfil de los residuos almacenados en ella. Lo que permitió extraer muestras a profundidades que no se tenían contempladas inicialmente (Tabla 5.1).

Considerando la forma de construcción de las presas de jales, al mezclar los residuos para incrementar la elevación de los bordos, se asumió que la toma de las 13 muestras en diferentes presas de jales, en diferentes puntos y a diferentes profundidades, fuera representativa para realizar el análisis de laboratorio que condujo a evaluar las propiedades geoquímicas, así como a predecir el potencial de generación de drenaje ácido de los residuos mineros.

Una vez realizado el muestreo el 12 de mayo de 2015, se procedió al traslado de las muestras en un contenedor hacia el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingeniería, almacenándolas a una temperatura de 4° C. En la Tabla 5.1 se muestran las hojas del registro de muestreo.

Tabla 5.1. Hoja de registro de muestreo de jales mineros de la Compañía Minera y Beneficiadora Purísima S. de R.L.

Muestra	Tipo de muestra	Hora del muestreo	Coordenadas geográficas	Profundidad (cm)	Observaciones
JLP1	Superficial	9:05	N 20°43.564" O 099°23.449"	30	Obtenida del vaso, coloración gris, no oxidados
JLP2	Vertical	9:09	N 20°43.564" O 099°23.449"	80	Obtenida del vaso, coloración gris, no oxidados
JLP3	Vertical	9:12	N 20°43.564" O 099°23.449"	130	Obtenida del vaso, coloración gris, no oxidados
JLP4	Vertical	9:28	N 20°43.564" O 099°23.449"	180	Obtenida del vaso, coloración gris, no oxidados
JLP5	Vertical	9:35	N 20°43.564" O 099°23.449"	390	Obtenida del vaso, coloración gris, no oxidados
JLP6	Vertical	9:40	N 20°43.564" O 099°23.449"	300	Obtenida del vaso, coloración rojiza, no oxidados,
JLP7	Vertical	10:12	N 20°43.596" O 099°23.522"	110	Obtenida del vaso, coloración gris, no oxidados
JLP8	Vertical	10:23	N 20°43.600" O 099°23.533"	120	Obtenida del vaso, coloración gris, no oxidados
JLP9	Superficial	10:42	N 20°43.612" O 099°23.616"	30	Obtenida del vaso, coloración gris, no oxidados
JLP10	Vertical	10:52	N 20°43.620" O 099°23.616"	55	Obtenida del vaso, coloración gris, no oxidados
JLP11	Superficial	11:04	N 20°43.643" O 099°23.626"	30	Muestra testigo, obtenida afuera de las presas de jales, coloración café claro
JLP12	Superficial	11:16	N 20°43.596" O 099°27.729"	30	Obtenida del vaso, coloración gris, no oxidados
JLP13	Vertical	11:21	N 20°43.588" O 099°23.727"	50	Obtenida del vaso, coloración gris, no oxidados



Figura 5.6. Localización de los puntos de muestreo en mapa satelital de la zona sur de Zimapán, Hidalgo (Google Earth, 2015).



Figura 5.7. Toma de la muestra JLP1, en la presa número 4 a una profundidad de 30 cm.



Figura 5.8. Sellado de recipientes con cinta adhesiva, que contienen a las muestras para evitar el contacto con el oxígeno hasta el análisis en laboratorio.



Figura 5.9. Cubriendo con papel aluminio los recipientes que contienen a las muestras para evitar el contacto con la luz hasta su refrigeración.

Es pertinente mencionar, el cuidado que se tuvo en el manejo de la muestras al prevenir cualquier alteración de las mismas, hasta el traslado al laboratorio. Como se muestra en la Figura 5.9 se cuidó que las muestras fueran cubiertas con papel aluminio para evitar que la luz estuviera en contacto con la muestra por una posible volatilización de algún elemento químico presente.



Figura 5.10. Presa de jales número 5 de la Compañía Minera y Beneficiadora Purísima.

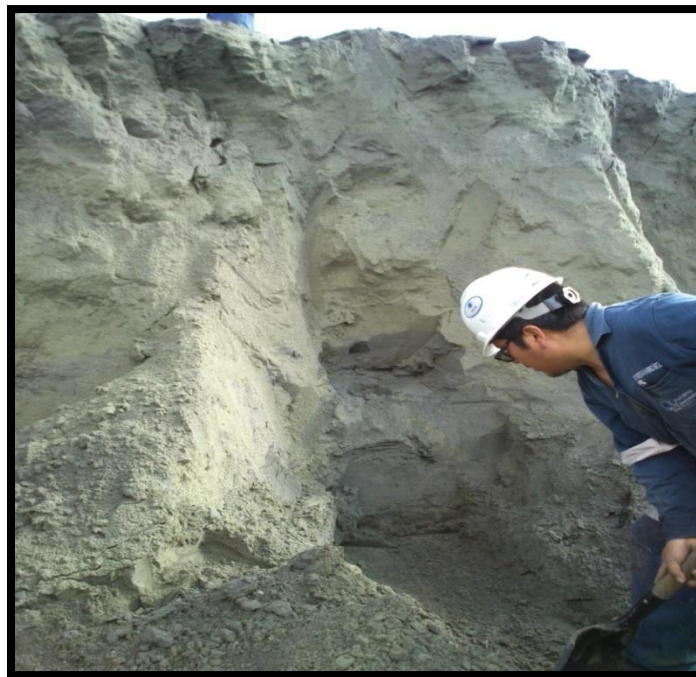


Figura 5.11. Perfil de los jales mineros depositados en la presa número 4 de la Compañía Minera y Beneficiadora Purísima.



Figura 5.12. Toma de la muestra JLP11 (muestra testigo) en un sitio apartado de las presas de jales mediante un cavahoyos.



Figura 5.13. Bordo de contención de la presa de jales número 1 de la Compañía Minera y Beneficiadora Purísima.

5.4 Montaje de las técnicas en laboratorio

Una vez obtenido el índice de textura de la roca antes del proceso de beneficio, se califica a la muestra en función de su potencial para generar el drenaje ácido, de no presentar potencial de generación el estudio termina aquí y no sería necesario un análisis más profundo. Sin embargo, de ser potencial generadora de este drenaje, el siguiente paso es analizar en laboratorio las muestras del jal minero.

Las pruebas y análisis que se realizan en el laboratorio son:

Pruebas para determinar la peligrosidad de un residuo:

- Determinación de las concentraciones totales

Cuando la concentración total de los elementos normados sea mayor que el correspondiente límite máximo permisible, se deberán realizar las pruebas de movilidad.

Pruebas geoquímicas estáticas:

- Prueba de pH en pasta
- Prueba de balance ácido-base

Pruebas de análisis mineralógico

- Microscopia electrónica de barrido
- Difracción de Rayos X

Pruebas geoquímicas cinéticas

- Prueba de celdas de humedad

El primer paso fue realizar la prueba de pH en pasta con el objetivo de estimar el potencial de acidez y el de neutralización, como se cita a continuación:

5.4.1 Prueba de pH en pasta

La prueba de pH en pasta se ejemplifica con el análisis de la muestra JLP12, obtenida de la presa de jales # 5 de la Compañía Minera y Beneficiadora Purísima S. de R.L. ubicada en Zimapán, Hidalgo, México, a una profundidad de 50 cm. Esta muestra fue seleccionada aleatoriamente. La prueba se realizó en el Laboratorio del Centro de Estudios Geológicos del Departamento de Ingeniería Minera y Recursos Naturales de la Universitat Politècnica de Catalunya.

Procedimiento:

Se calibra el medidor de pH con las soluciones patrón o buffer de pH = 4 y pH = 7 (Figura 5.14)



Figura 5.14. Calibración del medidor de pH.

Una vez realizada la molienda, la muestra se coloca en un vaso de precipitado una relación 1:3 de muestra y agua destilada, respectivamente, posteriormente se pesan y colocan 5 gramos de muestra (Figura 5.15) para agregar 15 mL de agua destilada (Figura 5.16)



Figura 5.15. Registro de peso de la muestra JLP12 para determinar la cantidad de agua destilada y desionizada a agregar.



Figura 5.16. Adición de la cantidad de agua destilada y desionizada a la muestra.

Una vez agregada el agua destilada y desionizada, se realizó la medición en el tiempo 0 se tomó la lectura a determinado tiempo (Figuras 5.18 y 5.19)



Figura 5.17. Primera medición (tiempo 0).



Figura 5.18. Mediciones consecutivas a un determinado tiempo.

La Tabla 5.2 proporciona los resultados de la prueba de una de las muestras de jales.

Tabla 5.2. Resultados de la prueba de pH en pasta para la muestra JLP12

TIEMPO (s)	TIEMPO (hr)	Hora	pH	mV	TEMPERATURA (°C)
0	0	02:30	8.34	-117	21
10	0.1667	14:40	7.78	-84	21
30	0.5	15:00	7.76	-82	21
60	1	15:30	7.70	-79	21
90	1.5	16:00	7.78	-85	21
120	2	16:30	7.77	-84	21
180	3	17:00	7.73	-81	21
210	3.5	17:30	7.73	-81	21
270	4	18:30	7.76	-82	21

En la Tabla 5.2 de los resultados de la prueba se observa que el pH de la muestra es estable ya que no hay variación alguna.

5.4.2 Montaje de la prueba estática basada en la prueba modificada balance ácido-base:

La Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003 en su Anexo Normativo 5 establece el procedimiento para realizar la prueba de Balance Ácido-Base para jales que contienen sulfuros de metales. Dicho procedimiento se basa en determinar el balance entre los minerales de las muestras que son productores de acidez y aquellos que por sus características son consumidores de acidez. Para ello, primero se selecciona el equipo de medición a utilizar, que en el presente estudio, fue un medidor de pH tanto en la prueba estática como en la prueba cinética de la marca HANNA, modelo HI 98129 previamente calibrado y limpio.



Figura 5.19. Equipo utilizado para la medición de pH.

Posteriormente, se continúa con la preparación de las muestras, iniciando con el secado y mezclado para homogeneizarlas. Del peso total se separó una porción de 20g para realizar las determinaciones de azufre, total y como sulfatos, conservándose a 4°C procurando evitar el contacto con aire y la luz. Adicionalmente se tomó otra porción de 10g para la determinación del balance ácido-base, tamizados a un tamaño < 0.74 mm (malla 200). Es pertinente mencionar que esta prueba se realizó por duplicado. En las Figuras 5.21 y 5.22 se aprecian estos pasos.



Figura 5.20. Secado de muestras a 35°C en un horno de convección.



Figura 5.21. Tamizado de las muestras a malla 200 a un tamaño de partícula de 75 μm .

Por lo que una vez preparadas las muestras se inicia con la prueba estática.

5.4.3 Montaje de la prueba cinética basado en el modelo de celdas de humedad:

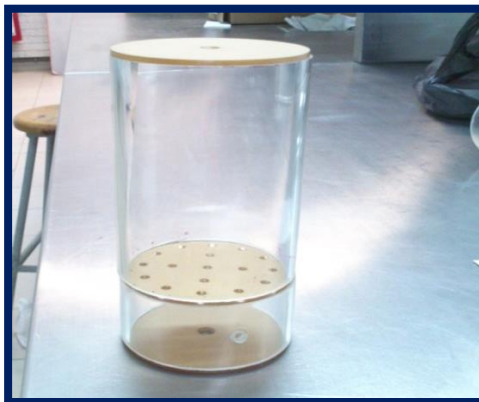
Para llevar a cabo la prueba cinética, se inició con el armado de las celdas de humedad, así como el arreglo del sistema de humidificado (Figura 5.22).



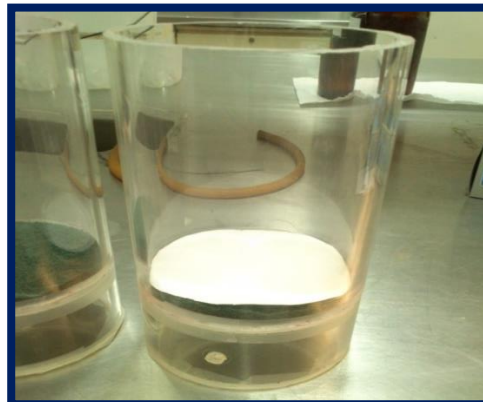
a)



b)

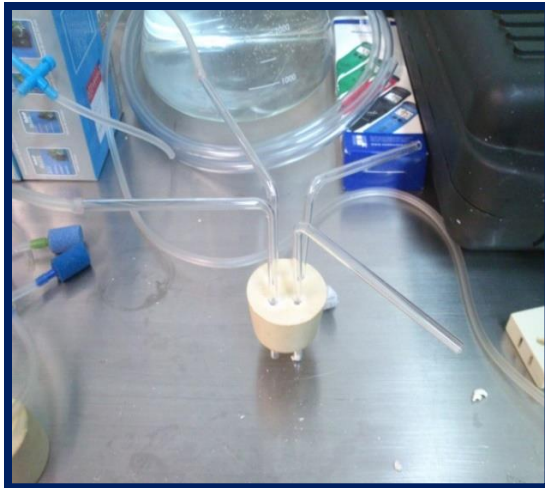


c)



d)

Figura 5.22. Fabricación de las celdas de humedad. Donde: a) corte de los tubos de acrílico, b) corte de las bases de las celdas, c) unión de la celda y d) colocación de la capa filtrante en las celdas.



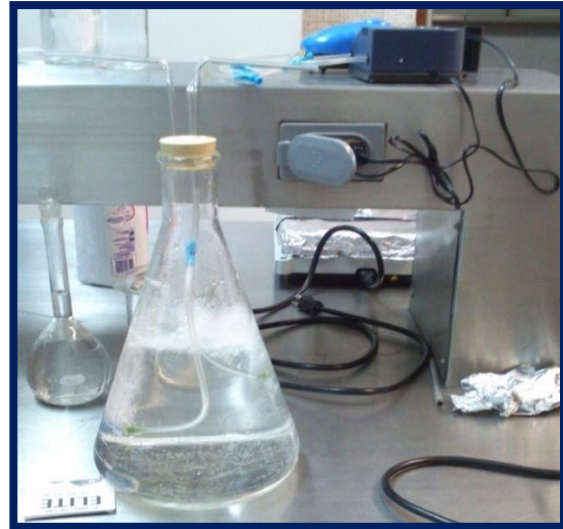
a)



b)



c)



d)



e)

Figura 5.23. a) Conexiones, b) manguera para pecera, c) tanque de dióxido de carbono, d) armado del sistema de humidificado y e) bomba para pecera.

Posteriormente, se realizaron pruebas para garantizar que no existieran pérdidas de residuo minero debido a la lixiviación y a través de la celda, es decir, se aseguró que fueran totalmente herméticas para evitar un intercambio de cualquier tipo de sustancia o aire en el interior de la misma, así como para verificar que se genere dicho lixiviado y asegurar la introducción de aire húmedo con las especificaciones indicadas en el Método 1627 de la EPA (Figura 5.24).

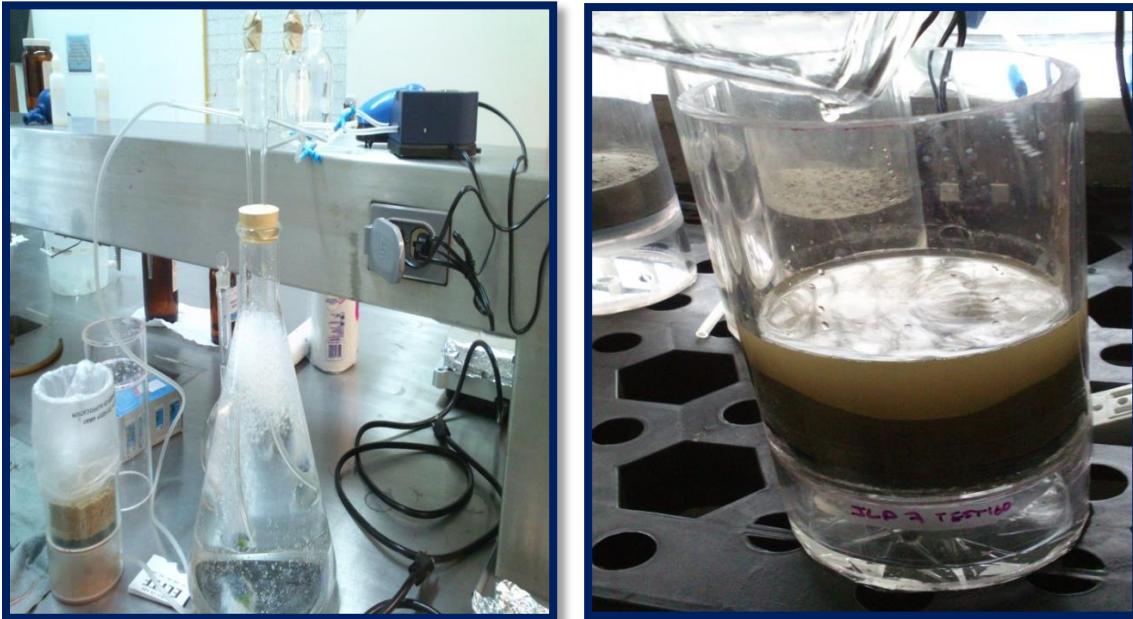


Figura 5.24. Ensayos con arena de playa y residuo minero para garantizar el funcionamiento de todo el sistema.

Una vez preparadas las celdas de humedad y con la certeza de que el modelo funcionaba se inició con la prueba cinética.

5.5 Análisis en laboratorio

Una vez montadas las húmedas y contando con las muestras, los materiales, instrumentos y equipos de medición preparados, se dispone a realizar ambas pruebas, iniciando con la prueba estática.

5.5.1 Prueba estática

La prueba se conforma de dos partes, la determinación del potencial de neutralización (PN) y la determinación del potencial de acidez (PA), iniciando con la primera.

5.5.1.1 Determinación del potencial de neutralización (PN)

Para esta prueba primero se prepararon las soluciones necesarias para llevar a cabo toda la determinación (Figura 5.25).



a)



b)

Figura 5.25. Preparación de soluciones para prueba estática. Donde: a) preparación de soluciones y b) finalización de soluciones

Esta prueba inició con la medición cualitativa de carbonatos, observando el grado de efervescencia que produce su transformación en dióxido de carbono, al agregarse unas gotas de ácido clorhídrico (HCl) al 25%. Como resultado de esta reacción se clasificó como nula, baja, moderada o fuerte (Figura 5.26).



a)



b)

Figura 5.26. Medición cualitativa de carbonatos en las muestras. Donde: a) preparación de las muestras para la adición de ácido clorhídrico y b) adición de ácido clorhídrico a cada una de las muestras.

En la Tabla 5.3 se muestran las reacciones obtenidas en todas las muestras.

Tabla 5.3. Reacción de los carbonatos en cada una de las muestras

Muestra	Peso (g)	Reacción
JLP 1	2.0008	Fuerte
JLP2	2.0016	Moderada
JLP 3	2.0008	Fuerte
JLP 4	2.0003	Fuerte
JLP 5	2.0008	Moderada
JLP 6	2.0002	Baja
JLP 7	2.0009	Moderada
JLP 8	2.0004	Fuerte
JLP 9	2.0002	Fuerte
JLP 10	2.0002	Fuerte
JLP 11	2.0002	Fuerte
JLP 12	2.0008	Fuerte
JLP 13	2.0001	Fuerte

Las muestras se colocaron en matraces Erlenmeyer de 250 mL, se agregaron 90 mL de agua destilada.

De acuerdo al grado de reacción se agregan mililitros de ácido clorhídrico con base en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4. Cálculo del volumen de HCl para determinar el potencial de neutralización (NOM-141-SEMARNAT-2003).

Grado de reacción (neutralización de carbonatos)	HCl solución 1.0 N (mL)	
	"Tiempo 0"	"Tiempo 2 horas"
Nulo	1.0	1.0
Bajo	2.0	1.0
Moderado	2.0	2.0
Fuerte	3.0	2.0

A continuación, se agitan las mezclas durante dos horas y se vuelve a agregar HCl de acuerdo con la Tabla 3.6, se continúan agitando por un periodo de 22 horas más y después de este periodo se mide el pH, si es mayor a 2.5 se agrega más HCl 1.0 N para disminuir la acidez hasta un valor de 2 y/o 2.5, registrando los volúmenes añadidos y se vuelven a agitar durante 2 horas más (Figura 5.27).



Figura 5.27. Agitación de mezclas por periodos de 2 y 22 horas.

Hasta este punto todas las mezclas, es decir, las muestras de jales y la muestra testigo de suelo no contaminado, no registraron pH menor a 2.5 por lo que fue necesario agregar más ácido clorhídrico, como se muestra en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5. Volumen de HCl 1.0 N agregado por muestra y registro de pH al final de la agitación. Va (volumen de HCl adicionado en la mezcla 2), Vb (Volumen de HCl adicionado en la mezcla 3) y Vc (Volumen de HCl adicionado en la mezcla 4).

Muestra	Mezcla 2	Mezcla 3	pH a las 22 hrs	Mezcla 4
	Va HCl 1 N (mL)	Vb HCl 1 N (mL)		Vc HCl 1 N (mL)
JLP 1	3	2	6.9	8.3
JLP2	2	2	6.63	4.1
JLP 3	3	2	6.35	4
JLP 4	3	2	6.74	17
JLP 5	2	2	6.35	4
JLP 6	2	1	4.6	1.2
JLP 7	2	2	6.25	2.5
JLP 8	3	2	6.38	10
JLP 9	3	2	6.43	8.5
JLP 10	3	2	6.5	12
JLP 11	3	2	8.3	60.8
JLP 12	3	2	6.5	3.5
JLP 13	3	2	6.6	6.5



Figura 5.28. Medición de pH después de la agitación y adición de HCl hasta la disminución de la acidez a un pH de 2.5.

Como siguiente paso, se adicionó agua destilada hasta alcanzar un volumen final aproximado de 125 mL y se tituló con una solución de NaOH 0.1 N, hasta llegar a un pH de 8.3 (Figura 5.29).



Figura 0.29 Figura 5.29. Titulación con solución NaOH.

Tabla 5.6. Volumen añadido de NaOH 0.1 N hasta alcanzar un pH de 8.3

Muestra	Volumen de NaOH 0.1 N (mL)
JLP1	2
JLP2	0.7
JLP 3	1
JLP 4	0.3
JLP 5	0.2
JLP 6	6.7
JLP 7	2
JLP 8	0.5
JLP 9	0.6
JLP 10	0.7
JLP 11	1.5
JLP 12	1.1
JLP 13	0.5

Enseguida se calculó el total de mililitros gastados de HCl 0.1 N de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$VF = Va + Vb + Vc$$

Como ejemplo, se calculó el volumen final de la muestra JLP1:

$$VF = 3 + 2 + 8.3 = 13.3 \text{ mL}$$

Tabla 5.7. Volumen final de HCl utilizado en la prueba para cada muestra

Muestra	Volumen final (mL)
JLP 1	13.3
JLP2	8.1
JLP 3	9
JLP 4	22
JLP 5	8
JLP 6	4.2
JLP 7	6.5
JLP 8	15
JLP 9	13.5
JLP 10	17
JLP 11	65.8
JLP 12	8.5
JLP 13	11.5

La prueba para determinar el potencial de neutralización (PN) finaliza expresando como kg de carbonato de calcio (CaCO_3) de cada tonelada de jales, y se calcula de acuerdo con la siguiente expresión:

$$PN = \frac{(\text{Volumen Final en mL de HCl}) - (0.1 \times \text{Volumen en mL de NaOH})}{\text{Peso de la muestra (g)}} \times 50$$

Como ejemplo, se calcula el potencial de neutralización de la muestra JLP1:

$$PN = \frac{(13.3 \text{ mL}) - (0.1 \times 2 \text{ mL})}{2.0008 \text{ g}} \times 50 = 327.3691 \text{ kg CaCO}_3/\text{ton}$$

Tabla 5.8. Potencial de neutralización de las muestras de jales.

Muestra	Profundidad (m)	Potencial de neutralización en kg CaCO_3 /ton
JLP 1	30	327.3691
JLP2	80	200.5895
JLP 3	130	222.4110
JLP 4	180	549.1676
JLP 5	390	199.4202
JLP 6	300	88.2412
JLP 7	110	157.4292
JLP 8	120	373.6753
JLP 9	30	335.9664
JLP 10	55	423.2077
JLP 11	30	1641.0859
JLP 12	30	209.6661
JLP 13	50	286.2357

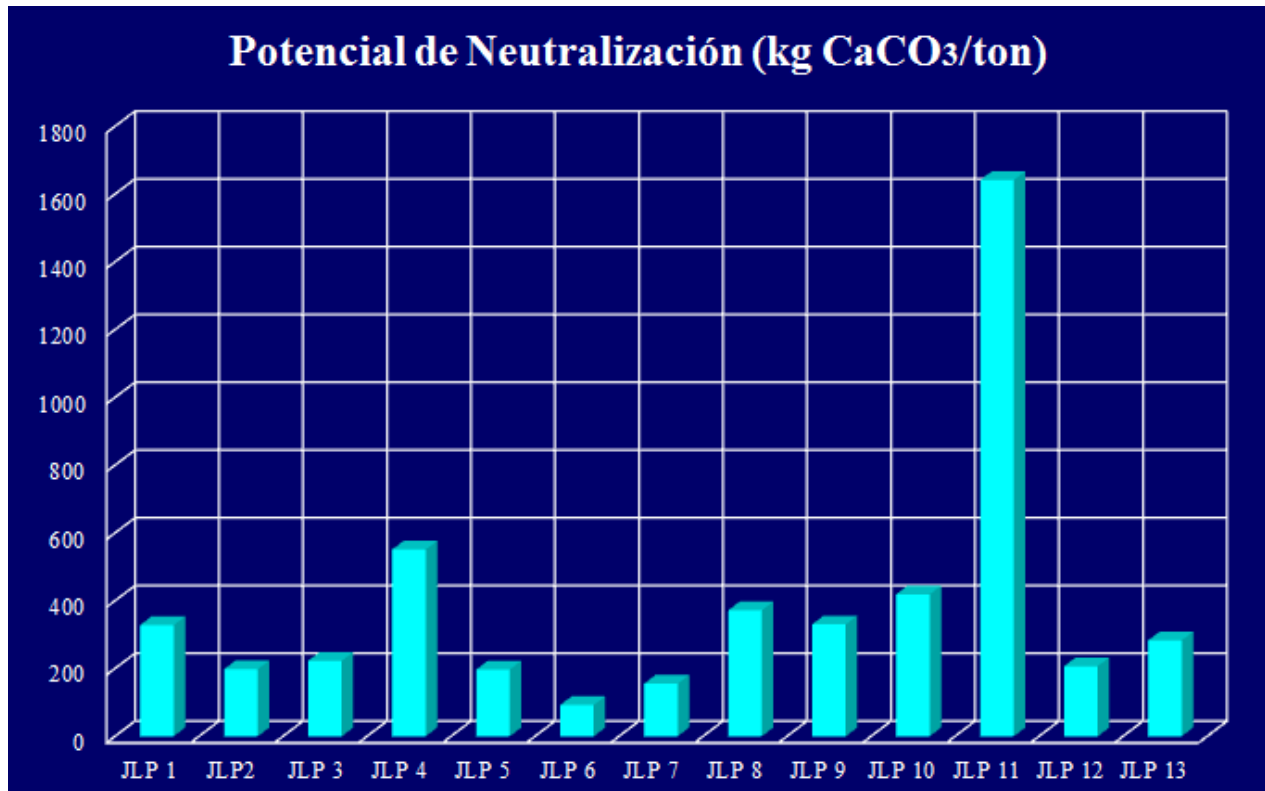


Figura 5.30. Gráfica del potencial de neutralización en kg de CaCO₃/ton.

5.5.1.2 Determinación del potencial de acidez (PA)

Con la finalidad de determinar el azufre en minerales de hierro, se determinó el azufre total de acuerdo a la NMX-B-400-1970, que especifica el disolver la muestra y añadir su contenido de azufre a sulfato de bario; se filtró, se calcinó y se pesó, además de efectuar una prueba en blanco siguiendo el mismo procedimiento. Asimismo, se determinó el azufre como sulfatos de acuerdo a la NMX-B-021-1982 con base en lo señalado en el punto 7.1.1, pesando y transfiriendo parte de la muestra a un matraz Erlenmeyer, agregando ácido clorhídrico. Se continuó con el procedimiento calentando dicha muestra hasta hervir y se pasó por un papel filtro de poro medio; los sulfatos se cuantifican por el método turbidimétrico EPA-9038, donde se establece el procedimiento para preparar la muestra y pasarla a una celda de absorbancia y realizar la medición de la turbidez con ayuda de un espectrofotómetro.

5.5.1.2.1 Determinación de azufre total

La prueba inicia pesando 4.57g de muestra y transfiriéndola a un vaso de precipitados de 600mL, se agregan 50mL de ácido nítrico concentrado y se lleva a calor suave durante 30 minutos (Figura 5.31).



a)

b)

Figura 5.31. Pesado, colocación de la muestra en vasos de precipitados y adición de ácido nítrico. Donde: a) colocación de la muestra en vidrios de reloj y b) adición de ácido nítrico en las muestras.

En la Tabla 5.9 se muestra el registro de los pesos de cada una de las muestras.

Tabla 5.9. Registro del peso de las muestras para la determinación de azufre total

Muestra	Peso (g)
Blanco (Arena)	4.57062
JLP1	4.5702
JLP2	4.5705
JLP3	4.5705
JLP4	4.57049
JLP5	4.57001
JLP6	4.57046
JLP7	4.57015
JLP8	4.57076
JLP9	4.57072
JLP10	4.57044
JLP11	4.57086
JLP12	4.57038
JLP13	4.57086

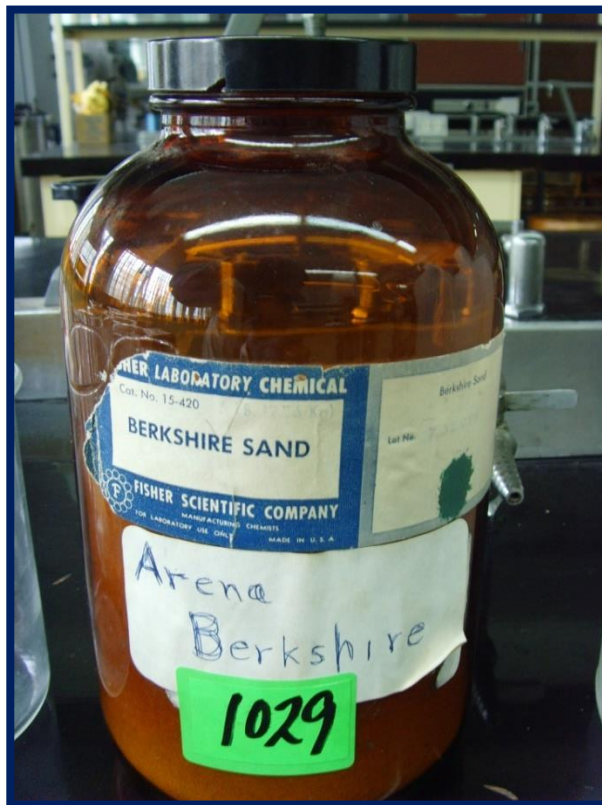


Figura 5.32. Arena Berkshire utilizada para el blanco.

Posteriormente, se agregaron 60 mL de ácido perclórico al 60% y se llevó a humos durante 15 minutos (Figura 5.33).



a)



b)

Figura 5.33. Adición de ácido perclórico, se llevan a humos las muestras en la campana de extracción. Donde: a) adición de ácido perclórico a las muestras y b) calentamiento de las muestras hasta llevarlas a humos.

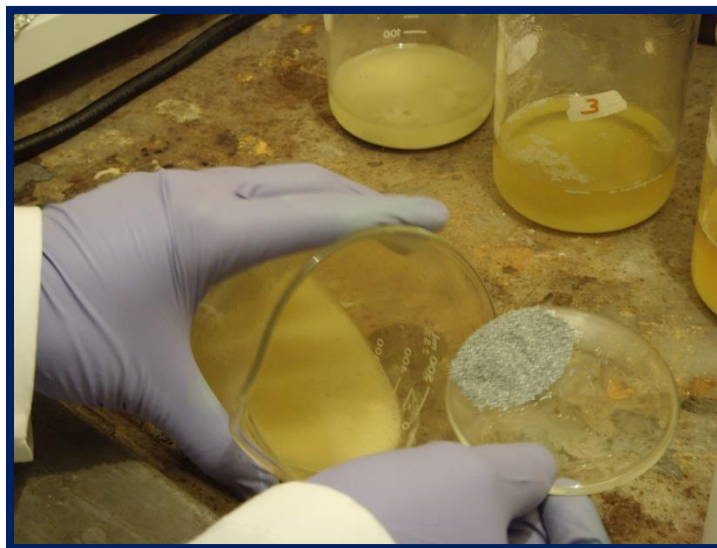
Como siguiente paso, se enfriaron, se enjuagaron las paredes y la cubierta del vaso y se llevó nuevamente a humos durante 10 minutos.

Después, se enfriaron nuevamente, se agregaron 50mL de ácido clorhídrico (1:9), 5g de zinc a 30 mallas y libre de azufre, y se llevó a calor suave hasta que se redujo el hierro (Figura 5.34).



a)

b)



c)

Figura 5.34. Adición de zinc y se llevan a calor suave las muestras. Donde: a) reactivo utilizado (zinc), b) calentamiento de las muestras hasta reducir el hierro y c) adición del zinc.

La siguiente parte de la prueba consistió en filtrar las muestras a través de un papel filtro de poro medio resistente al ácido, recibiendo la solución en un vaso de precipitados de 400mL y lavando con

75mL de ácido clorhídrico (2:98) caliente, se diluye a 250mL, se lleva a ebullición y se agregan 10mL de la solución de cloruro de bario dejando sedimentar de un día para otro.

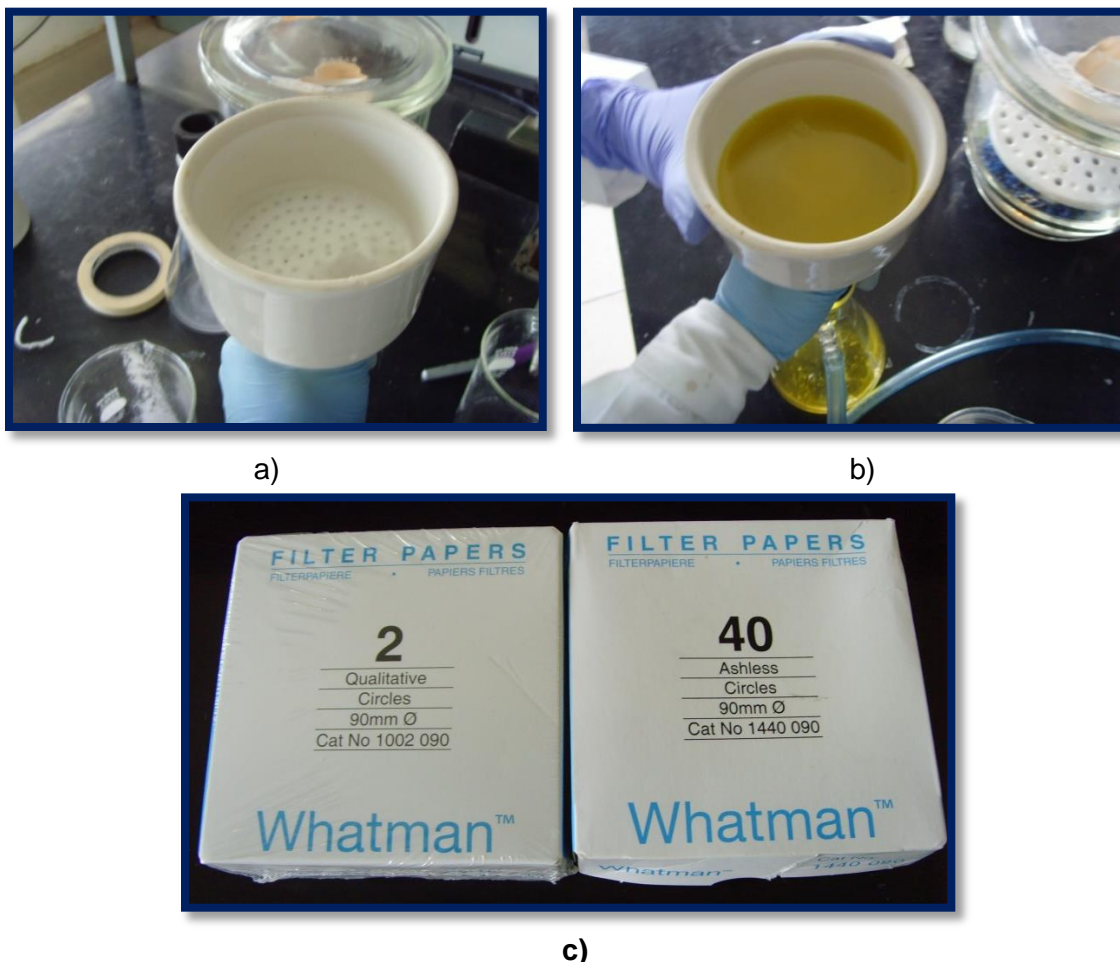


Figura 5.35. En el sentido de las manecillas del reloj, se presenta el montaje del sistema de filtración, la filtración de las muestras y el papel filtro utilizado. Donde: a) montaje del sistema de filtración, b) procedimiento de filtración de las muestras y c) papel filtro utilizado.



Figura 5.36. Muestra después del filtrado.

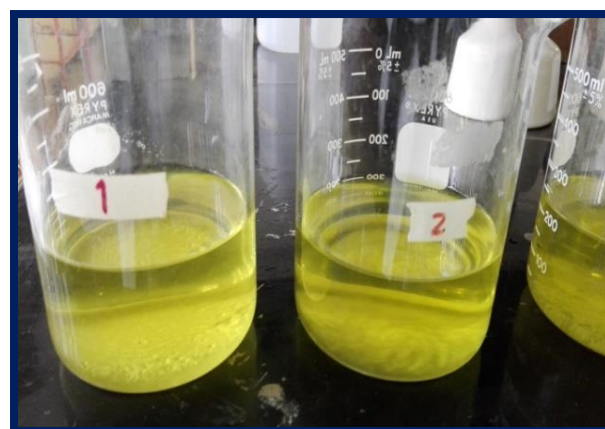


Figura 5.37. Muestras al día siguiente del filtrado.

Continuando con el procedimiento, se transfirieron las muestras a través de un papel filtro de poro cerrado usando la pulpa, lavando el precipitado con solución caliente de cloruro de bario y ácido clorhídrico hasta ausencia de hierro, y después con agua caliente hasta ausencia de cloruros.

Por último, el papel y los precipitados se pasaron a un crisol de porcelana, se secaron, se carbonizaron el papel sin permitir que se inflamara, esto fue a una temperatura de 150°C, se calcinaron durante 15 minutos a 980°C, se enfriaron en un desecador y se pesaron (Figuras 5.38 y 5.39).

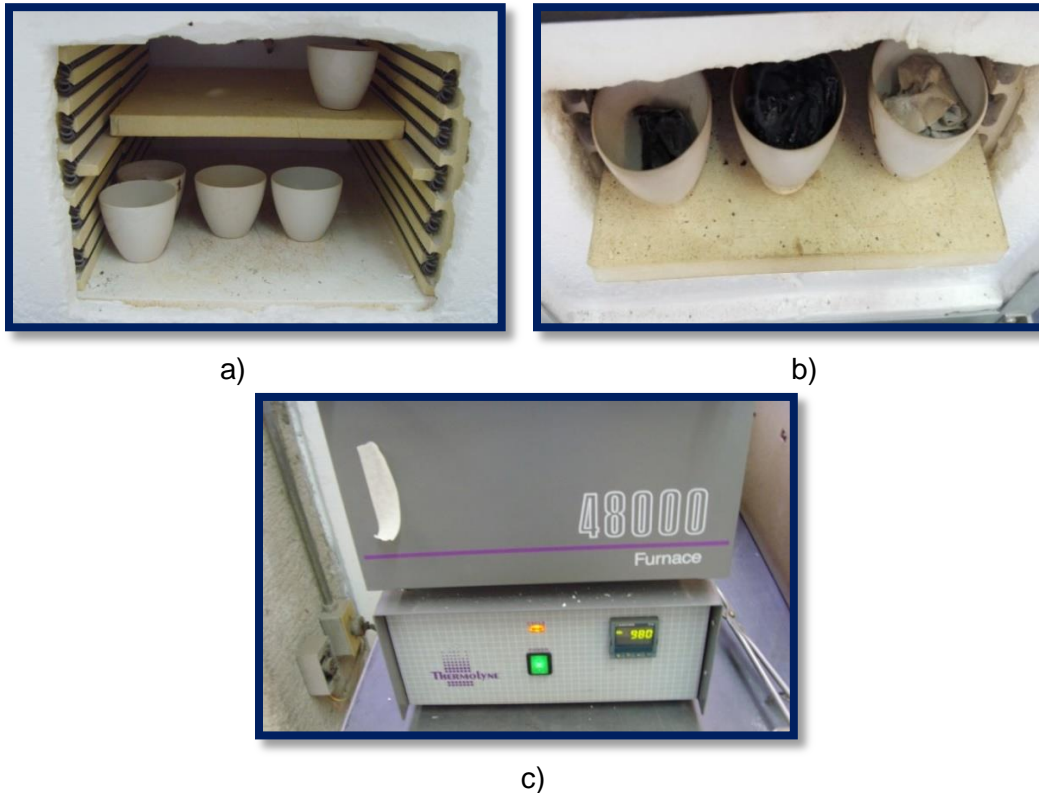


Figura 5.38. Colocación de los crisoles de porcelana al horno, carbonizando el papel filtro y calcinando a 980°C. Donde: a) colocación de los crisoles de porcelana al horno, b) carbonización del papel filtro y c) muestras a una temperatura de 980°C

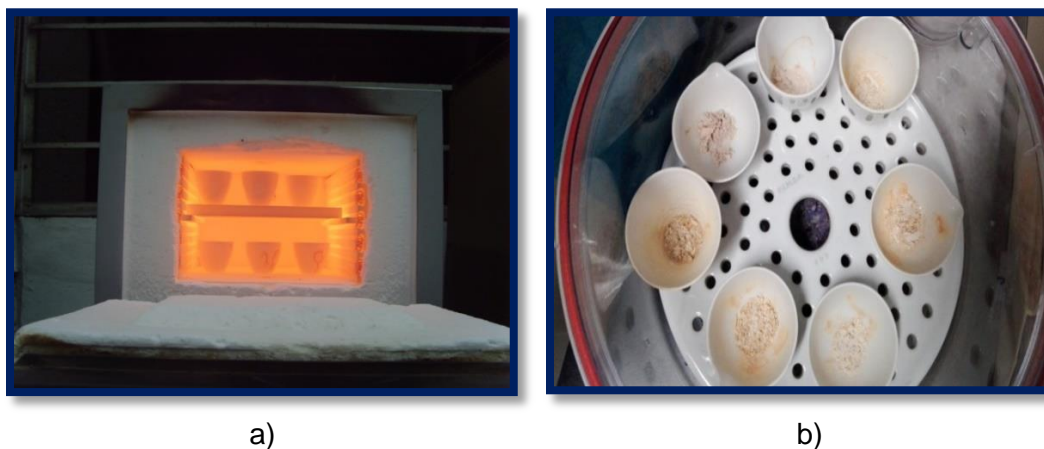


Figura 5.39. Retiro de los crisoles del horno, colocación en desecador y precipitado obtenido del blanco y cinco muestras. Donde: a) retiro de los crisoles del horno y b) colocación de los crisoles de porcelana en un desecador.

Tabla 5.10. Registro del peso de cada crisol por muestra y el peso del crisol con el precipitado

Muestra	Peso del crisol (g)	Peso del crisol con precipitado (g)
Blanco (Arena)	16.6278	16.6563
JLP1	17.5901	18.3794
JLP2	17.1749	17.9971
JLP3	17.2956	19.174
JLP4	16.9118	18.0469
JLP5	17.0202	17.8333
JLP6	28.9794	29.7498
JLP7	24.3817	25.4665
JLP8	31.9943	33.2889
JLP9	16.6362	17.5796
JLP10	33.6813	35.1275
JLP11	22.7467	23.0316
JLP12	27.0096	28.9271
JLP13	26.9271	27.766

Para determinar el azufre total, se calculó con la siguiente fórmula:

$$\% S = (A - B) \times 3$$

Donde:

A = Peso en gramos del precipitado de sulfato de bario contenido en la muestra.

B = Peso del precipitado de sulfato de bario obtenido en la prueba en blanco.

En la Tabla 5.11 se muestra la diferencia del peso del precipitado de las muestras y el peso del precipitado de la prueba en blanco.

Tabla 5.11. Registro del peso del precipitado en las muestras, el peso del precipitado en la prueba en blanco y el contenido de azufre total en porcentaje

Muestra	Peso del crisol (g)	Peso del crisol con precipitado (g)	A	B	Contenido de azufre (%)
Blanco (Arena)	16.6278	16.6563		0.0285	
JLP1	17.5901	18.3794	0.7893		2.2824
JLP2	17.1749	17.9971	0.8222		2.3811
JLP3	17.2956	19.174	1.8784		5.5497
JLP4	16.9118	18.0469	1.1351		3.3198
JLP5	17.0202	17.8333	0.8131		2.3538
JLP6	28.9794	29.7498	0.7704		2.2257
JLP7	24.3817	25.4665	1.0848		3.1689
JLP8	31.9943	33.2889	1.2946		3.7983
JLP9	16.6362	17.5796	0.9434		2.7447
JLP10	33.6813	35.1275	1.4462		4.2531
JLP11	22.7467	23.0316	0.2849		0.7692
JLP12	27.0096	28.9271	1.9175		5.6670
JLP13	26.9271	27.766	0.8389		2.4312

5.5.1.2.2 Determinación de azufre en forma de sulfatos

Esta determinación se inició con la elaboración de una curva de calibración con solución de sulfato con incrementos en la dosis de 5mg/L, y realizando la medición con un turbidímetro.

Tabla 5.12. Soluciones de sulfato estándar de H₂SO₄

Soluciones de sulfato estándar (mg/L)	Turbidez (NTU)
5	11.4
10	34.5
15	45.2
20	65.2
25	87.5



Figura 5.40. Preparación de las soluciones para la curva de calibración

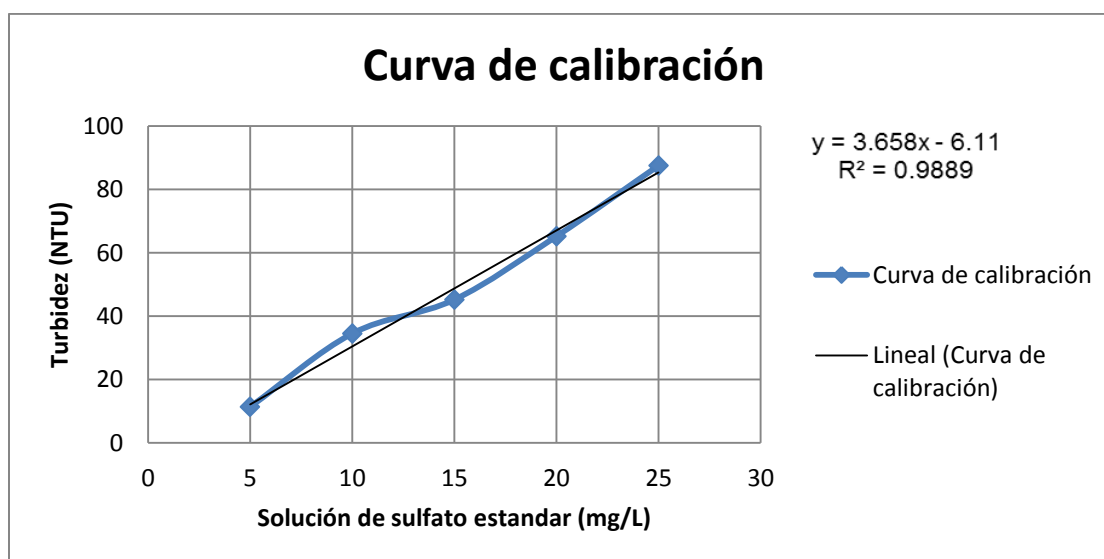


Figura 5.41. Curva de calibración.

Una vez realizada la curva de calibración, se inició con el procedimiento de preparación de las muestras, agregando una muestra blanco como referencia de la turbidez de las soluciones por sí mismas, empezando por el registro del peso de cada una de las muestras, tomando 2 gramos de cada una y transfiriéndolos a un matraz Erlenmeyer de 250 mL.



Figura 5.42. Transferencia de las muestras a matraces Erlenmeyer

Posteriormente, se adicionaron 50mL de ácido clorhídrico (2+23), agitando constantemente para humedecer toda la muestra y hervir cada muestra durante 30 minutos.



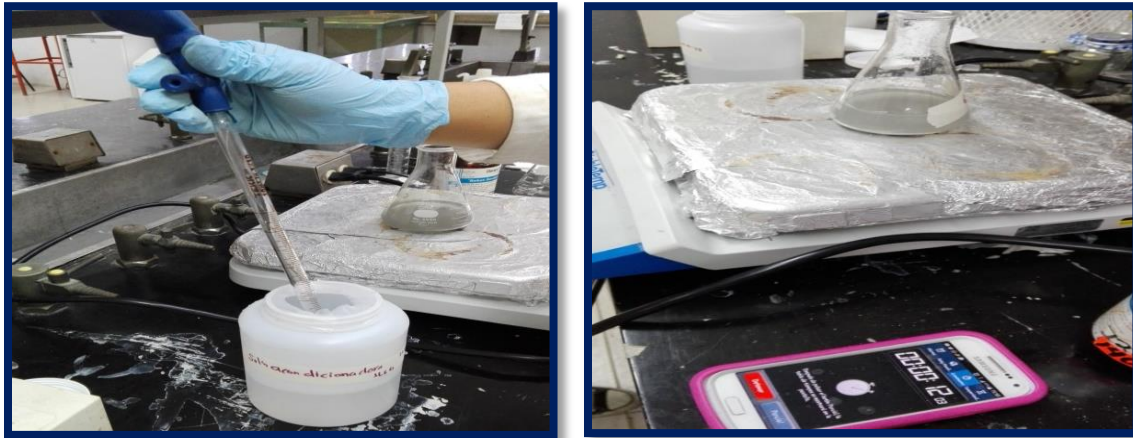
Figura 5.43. Agitación y calentar hasta ebullición cada muestra.

El procedimiento continuó con una filtración por papel filtro de poro medio, recogiendo los lavados en vasos de precipitados, haciendo lavados en los matraces Erlenmeyer para asegurar que todo el extracto fuera transferido.



Figura 5.44. Agitación y ebullición de cada muestra.

El siguiente paso es agregar 5 mL de una solución acondicionadora, la cual está compuesta por ácido clorhídrico, etanol y cloruro de sodio seguido de un periodo de agitación.

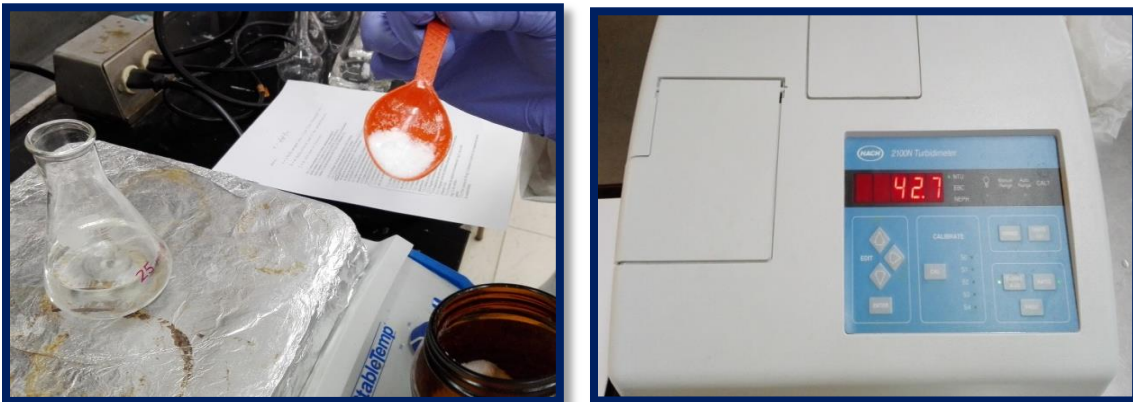


a)

b)

Figura 5.45. Adición de la solución acondicionadora y el periodo de agitación. Donde: a) adición de la solución acondicionadora y b) medición del periodo de agitación.

Por último, se adicionó cloruro de Bario (BaCl) en forma de cristales, se agitó por un periodo de un minuto y exactamente después se midió la turbidez.



a)

b)

Figura 5.46. Adición de cloruro de bario (BaCl), agitación y medición de la turbidez. Donde: a) adición de cloruro de bario a cada muestra y b) registro de la turbidez.

Debido a la turbidez que presentaron las muestras, se realizaron diluciones diferentes para cada muestra con el objetivo de que se encontraran en el rango de la curva de calibración.

El porcentaje de azufre en forma de sulfatos contenido en cada muestra se calculó por medio de la ecuación de la curva de calibración, restando la turbidez obtenida en la muestra blanco.

Tabla 5.13. Azufre en forma de sulfatos de cada una de las muestras.

Muestra	NTU	Dilución	mg/L	Azufre en forma de sulfatos %
Blanco	5.66	1	3.2176	0.0003
JLP1	62.6	10	187.8349	0.0185
JLP2	29.4	10	97.0749	0.0094
JLP3	47.2	10	145.7354	0.0143
JLP4	49.9	10	153.1165	0.0150
JLP5	52.5	20	320.4483	0.0317
JLP6	50.3	10	154.2100	0.0151
JLP7	88.1	10	257.5451	0.0254
JLP8	59.4	10	179.0869	0.0176
JLP9	46	20	284.9098	0.0282
JLP10	49.9	20	306.2329	0.0303
JLP11	25.2	100	855.9322	0.0853
JLP12	23.4	10	80.6725	0.0077
JLP13	42.7	10	133.4336	0.0130

Por lo que una vez determinado el azufre total y el azufre en forma de sulfatos contenidos en las muestras y de acuerdo a la NOM-157-SEMARNAT-2009 se calcula el potencial de acidez.

De acuerdo a la NOM-141-SEMARNAT-2003 y a la literatura, partiendo de que 1 ton de jales que contiene 10 kg de S (1%) requieren 31.25 kg de CaCO₃ para no producir acidez se presenta la siguiente ecuación.

$$PA = \%S^{2-} \times 31.25$$

Donde:

$$\%S^{2-} = (\% S \text{ total} - \% S \text{ sulfatos})$$

Mostrando a manera de ejemplo el cálculo para la muestra JLP1:

$$\%S^{2-} = (\% S \text{ total} - \% S \text{ sulfatos}) = 2.2824 - 0.0185 = 2.2639$$

$$PA = \%S^{2-} \times 31.25 = 70.7481$$

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5.14.

Tabla 5.14. Azufre en forma de sulfatos de cada una de las muestras.

Muestra	Profundidad (m)	Contenido de azufre total (%)	Azufre como sulfatos (%)	Potencial de Acidez (PA) en Kg de CaCO ₃ /ton
JLP1	30	2.2824	0.0185	70.7481
JLP2	80	2.3811	0.0094	74.1161
JLP3	130	5.5497	0.0143	172.9827
JLP4	180	3.3198	0.0150	103.2753
JLP5	390	2.3538	0.0317	72.5649
JLP6	300	2.2257	0.0151	69.0813
JLP7	110	3.1689	0.0254	98.2333
JLP8	120	3.7983	0.0176	118.1473
JLP9	30	2.7447	0.0282	84.8916
JLP10	55	4.2531	0.0303	131.9624
JLP11	30	0.7692	0.0853	21.3728
JLP12	30	5.367	0.0077	167.4767
JLP13	50	2.4312	0.0130	75.5681

5.5.2 Análisis mineralógico

El análisis mineralógico tuvo la finalidad de conocer el contenido de minerales alojados en las muestras que permitieron corroborar la información obtenida de las pruebas estáticas, dicho análisis se puede llevar a cabo por medio de la técnica de difracción de rayos x.

5.5.2.1 Difracción de rayos x

Como primer paso se inicia con la preparación de las muestras. Se molieron las muestras hasta un tamaño de partícula <2 mm

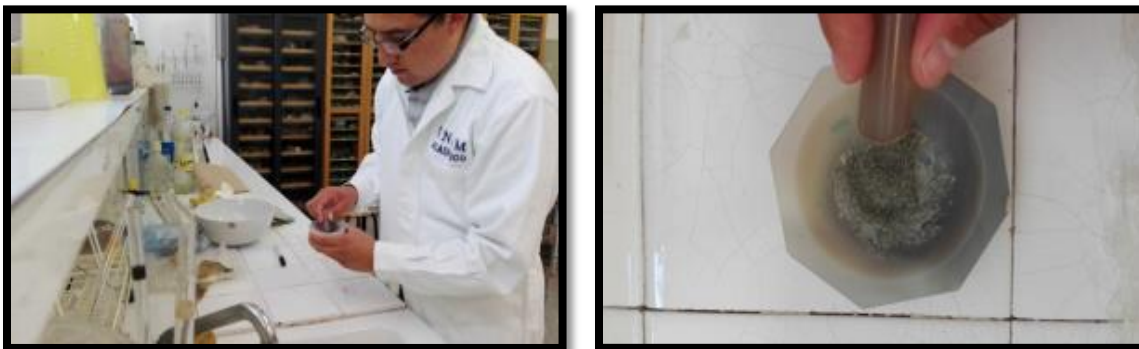


Figura 5.47. Proceso de molienda de las 13 muestras.

Una vez realizada la molienda, se colocaron las muestras en las cápsulas de polietileno de alta densidad previamente lavados.



Figura 5.48. Colocación de muestra en los recipientes de polietileno de alta densidad

La identificación de los minerales en las muestras de residuos mineros fue apoyada en la difracción de polvo de rayos X (DRX). Realizando difracciones de los diferentes materiales de los jales mediante un difractómetro de geometría Bragg-Brentano PANalytical X'Pert system acoplado con monocromador de grafito, rendija automática, radiación $K\alpha$ del Cu ($\lambda = 1.54061 \text{ \AA}$), potencia de trabajo 45 kV - 40 mA, rango de barrido $4-100^\circ 2\theta$ con paso de $0.017^\circ 2\theta$ y tiempo de medida de 50 s, ubicado en los "Centros Científicos y Tecnológicos de la Universitat de Barcelona".

El análisis mineralógico se ejemplifica con la muestra de jales JLP1 obtenida a 30cm de profundidad, los resultados de las demás muestras se presentan en el Anexo D.

El análisis mineralógico permitió obtener la información que se muestra en la Figura 5.49.

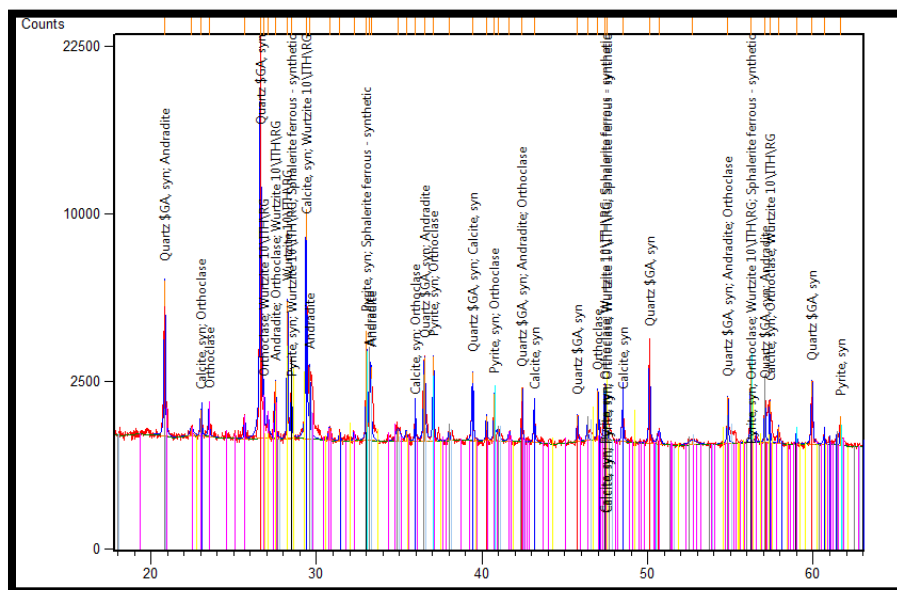


Figura 5.49. Gráfica de resultados que entrega el programa del contenido mineral de la muestra JLP1, extraída a una profundidad de 30cm.

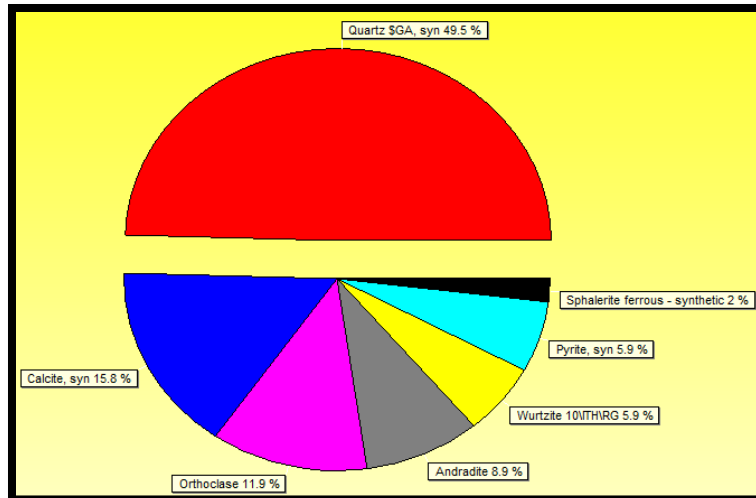


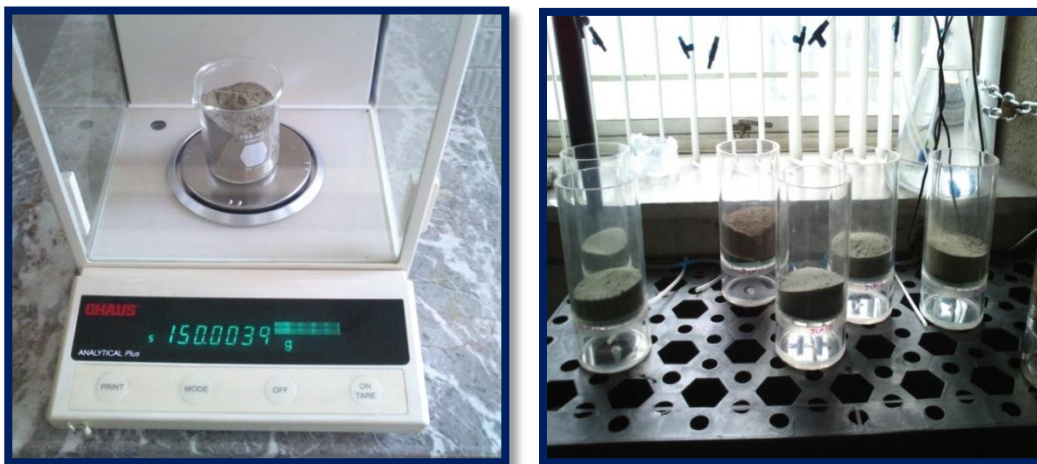
Figura 5.50. Gráfica de pastel del contenido mineral de la muestra JLP1, extraída a una profundidad de 30cm.

La Figura 5.50 muestra el porcentaje de minerales encontrados en la muestra JLP1, destacando a la calcita con 14.8% y a la pirita con 5.9% de la muestra analizada. La información obtenida con el empleo de dicha técnica correspondió a la composición mineral así como la distribución de la misma, lo cual permitió evaluar los posibles productores de drenaje ácido, como es la pirita, o los posibles neutralizadores de dicha acidez, como es la calcita, lo cual permitirá dar una calificación de la muestra.

5.5.3 Prueba cinética

Una vez armadas las celdas de humedad y del sistema humidificado, se procedió a la colocación de la muestra dentro de cada una de las celdas previamente identificadas.

El siguiente paso fue pesar los 300 gramos de cada muestra de residuo minero y pasarlos a cada una de las celdas (Figura 5.51).

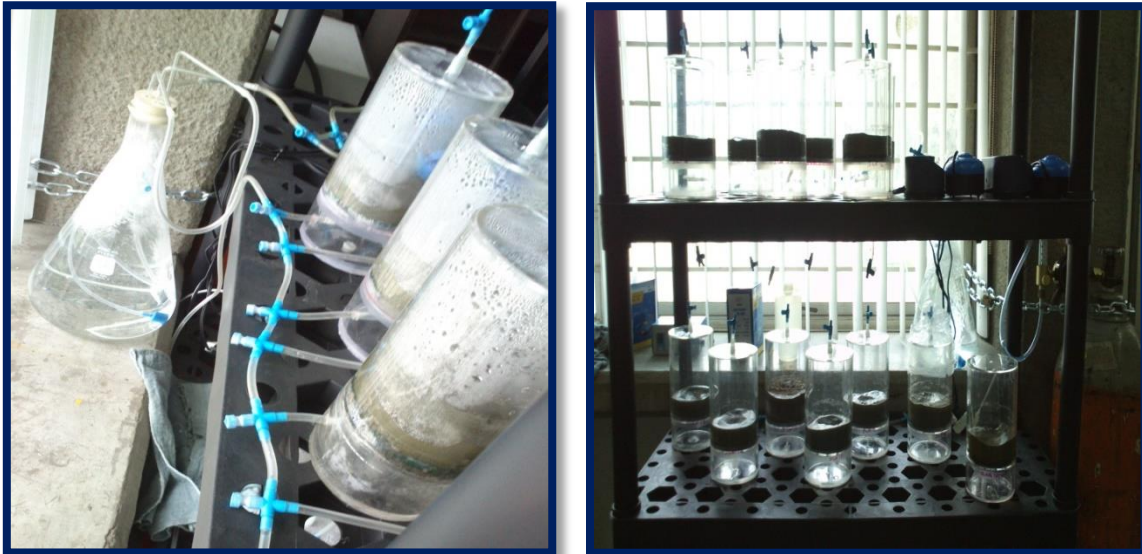


a)

b)

Figura 5.51. Medición del peso de las muestras y disposición en cada una de las celdas. Donde: a) registro del peso de las muestras y b) colocación de las muestras dentro de las celdas.

Se taparon y sellaron las celdas garantizando que no hubiera escape del aire que se inyectará (Figura 5.52).



a) b)
Figura 5.52. Sistema de celdas de humedad completo. Donde: a) conexión del sistema humidificado a las celdas y b) sistema de celdas de humedad completo.

5.5.3.1 Simulación acelerada del intemperismo

Esta prueba inició con un primer lavado y una primera medición, correspondiente a la semana 0 en el registro, para conocer los valores iniciales a partir de la ejecución de la prueba. El lavado se realizó con agua destilada para evitar que contaminantes externos alteraran a la muestra y se introdujo por medio de una piseta vertiendo el agua en las paredes de las celdas para evitar carga hidráulica y con ello no propiciar grietas en la muestra que faciliten la conducción del agua, pues un objetivo de la prueba es que el agua pase a través de la muestra por sí misma sin generar interferencias en los resultados.

El modelo está compuesto de 14 celdas de humedad, incluyendo 13 muestras extraídas en la campaña de muestro y por un duplicado seleccionado aleatoriamente que no se incluyó en el sistema de humidificado, sin embargo, en dicha muestra se aplicaron lavados semanales, con la finalidad de evaluar la prueba.

Al iniciar la prueba con el primer lavado, se tomó el registro, iniciando el martes 14 de julio de 2015 a las 10:30 horas, por lo que el miércoles 15 de julio a las 10:30 se inició la introducción del aire húmedo a las celdas.

5.5.3.2 Determinación de parámetros

Los parámetros que se determinaron en este tipo de pruebas dependieron en cierta medida de los objetivos del estudio, para esta prueba se establecieron los parámetros de potencial de Hidrógeno y la conductividad eléctrica para medirse en los lixiviados de cada lavado semanal de cada muestra.

5.5.3.3 Potencial de Hidrógeno (pH)

El potencial de Hidrógeno se determinó con la finalidad de tener un registro sobre la variabilidad en la acidificación o en su caso neutralización de la muestra con el paso del tiempo.

5.5.3.4 Conductividad Eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica permite observar el comportamiento de las sales en las muestras, así como la oxidación de los sulfuros metálicos al pasar el periodo de análisis.

A cada lixiviado se realizó la medición de pH y conductividad eléctrica, estos lixiviados se dispusieron en contenedores especiales para su posterior manejo, como se muestra en la Figura 5.53.



a)

b)

Figura 5.53. Mediciones de pH, conductividad eléctrica y el recipiente con los lixiviados de los lavados semanales. Donde: a) obtención de lixiviados y b) registro de pH de cada muestra.

5.5.3.5 Alcalinidad

Dado que los resultados corresponden a valores alcalinos, y siguiendo las recomendaciones de la EPA en su método 1627, el cual menciona que se tienen resultados confiables a partir de la semana 12, se realizaron pruebas de alcalinidad a todos y cada uno de los lixiviados a partir de dicha semana.

La determinación de alcalinidad se realizó con base en la NMX-AA-036-SCFI-2001, la cual establece el método de prueba para la determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

El procedimiento consistió en colocar un volumen de muestra en un matraz Erlenmeyer, posteriormente, se agregaron gotas de fenolftaleína y luego gotas de anaranjado de metilo y por último se tituló con ácido sulfúrico 0.02 N.

La alcalinidad se calculó por medio de la siguiente fórmula:

$$\text{Alcalinidad como CaCO}_3 \text{ en mg/L} = \frac{\text{Volumen de H}_2\text{SO}_4 \times 1000 \times 50}{\text{Volumen de muestra en gramos}}$$



Figura 5.54. Determinación de Alcalinidad en lixiviados de prueba cinética.

5.5.4 Análisis químico

Simultáneamente a la prueba cinética, es recomendable realizar un análisis químico de las muestras de acuerdo con la metodología propuesta por la Universidad Politécnica de Cataluña, por medio de la técnica de Microscopía electrónica de barrido, que confirme los resultados de la prueba cinética.

Microscopía electrónica de barrido

El equipo utilizado fue un microscopio electrónico de barrido (MEB) Hitachi T1000 tabletop (Figura 5.56) con el que cuenta el Departamento de Ingeniería Minera, Industrial y TIC de la Universidad Politécnica de Catalunya. El software utilizado para la identificación y valoración semicuantitativa de las fases fue el XPert Graphics Identify Philips.



Figura 5.55. Microscopio electrónico de barrido Hitachi TM-1000

Material:



a)



b)

Figura 5.56. a) Cinta conductora de carbón y b) porta muestra.

La identificación química se ejemplifica con la muestra JLP6, extraída a 300 cm de profundidad, los resultados completos se muestran en el Anexo E.

El procedimiento inició con la colocación de un tramo de la cinta conductora de carbón en el porta muestras previamente lavado (Figura 5.57).



a)



b)

Figura 5.57. a) Colocación de la cinta conductora de carbón en el porta muestras, b) cinta conductora lista para sujetar la muestra.

Se analizó una pequeña porción de la muestra en el equipo, adhiriéndola a la cinta conductora de carbón (Figura 5.58).



a)



b)

Figura 5.58. a) Toma de una porción de la muestra, b) acercamiento del porta muestras para sujetar la porción de muestra a analizar.

Se colocó el porta muestras al equipo de microscopía electrónica de barrido (Figura 5.59).



Figura 5.59. Colocación del porta muestras en el microscopio electrónico de barrido.

Se cerró el apartado del porta muestras y se inicia el proceso de vacío en el microscopio electrónico (Figura 5.60).



Figura 5.60. Encendido del microscopio electrónico de barrido.

Una vez listo el equipo para el análisis, se inició el software del equipo (Figura 5.61).

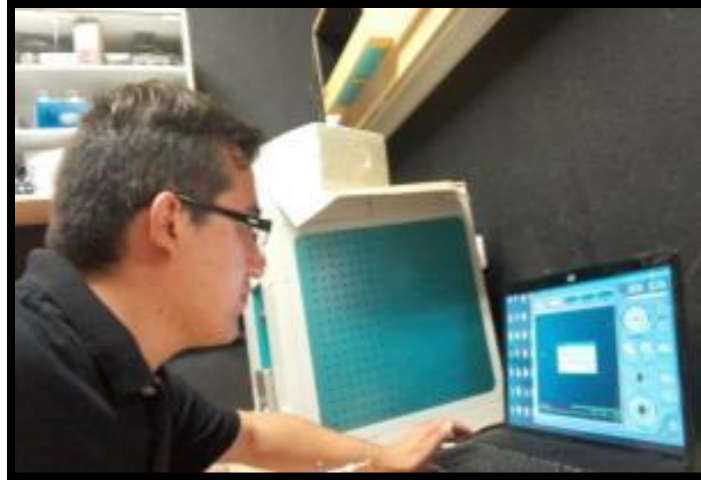


Figura 5.61. Análisis de la muestra con el apoyo de software.

A partir de este punto, se seleccionaron las partículas o el área de interés a analizar para identificar sus minerales. Observándose de este modo las partículas con ayuda del software en la pantalla de la computadora (Figura 5.62).

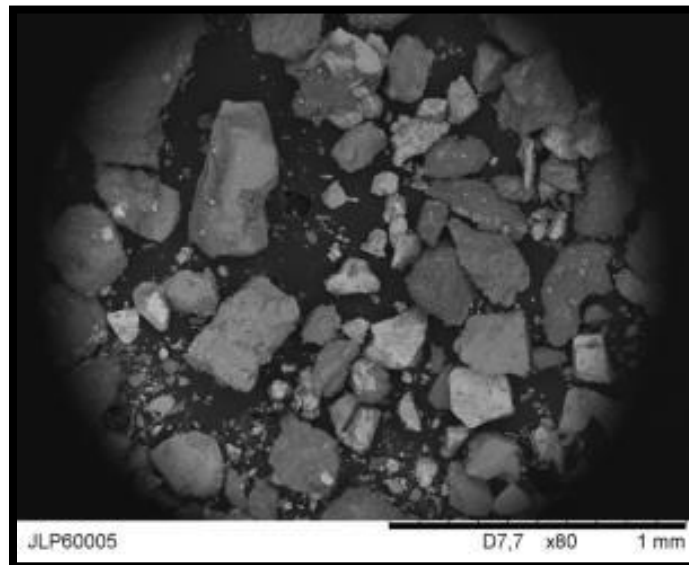


Figura 5.62. Partículas de la muestra JLP6

Las imágenes permitieron observar a las partículas con distintos acercamientos, lo que permitió observar colores distintos en una única partícula debido a una mezcla de minerales en su estructura. Para ello, se analiza el área o el punto seleccionado y el software del equipo (Bruker Quantax 50) entrega como resultado espectros identificando los minerales contenidos (Figura 5.64).

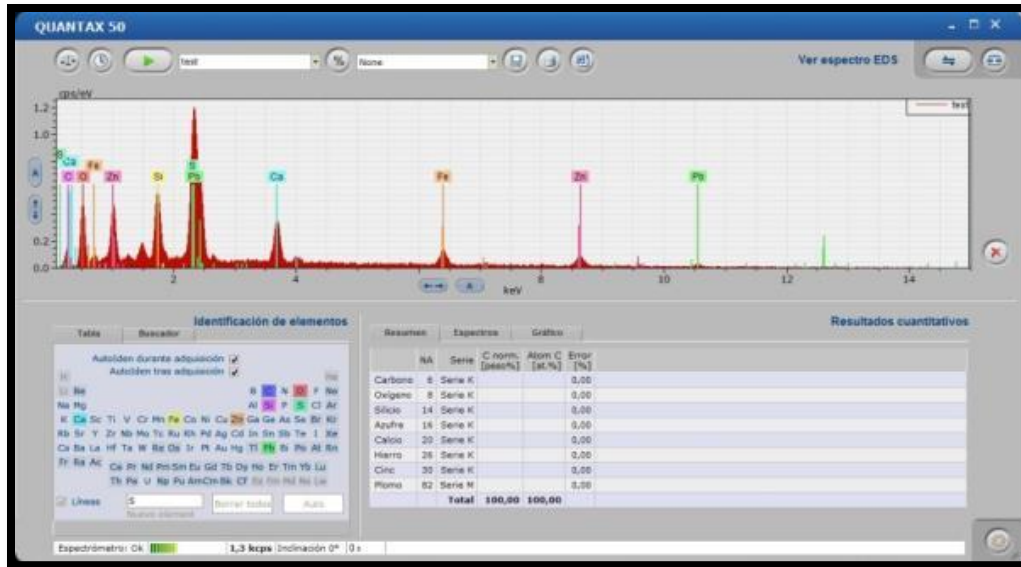


Figura 5.63. Resultados del análisis.

Este análisis además de permitir la identificación de la composición mineralógica de la muestra también permitió conocer la composición de la textura de la muestra microscópicamente.

Ejemplo de análisis en un punto de interés en una partícula

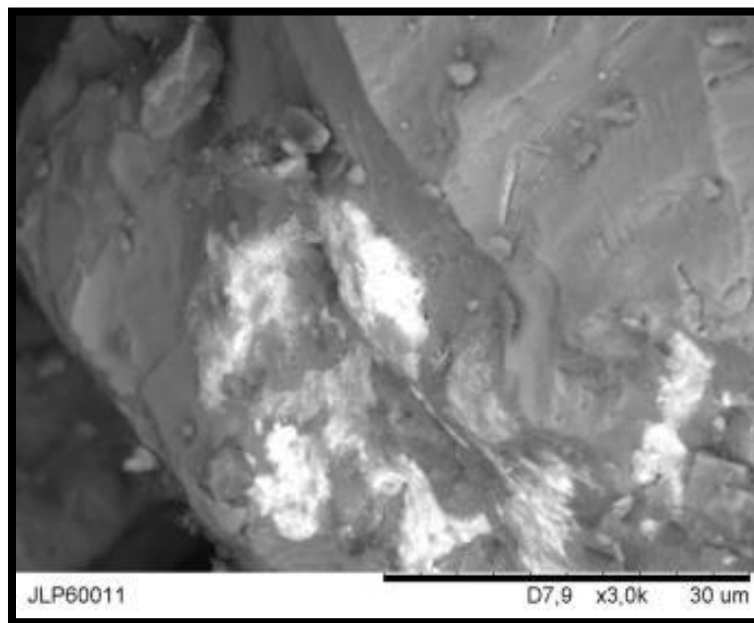


Figura 5.64. Fracción de una partícula de interés

El punto central fue el que se analizó (Figura 5.65).

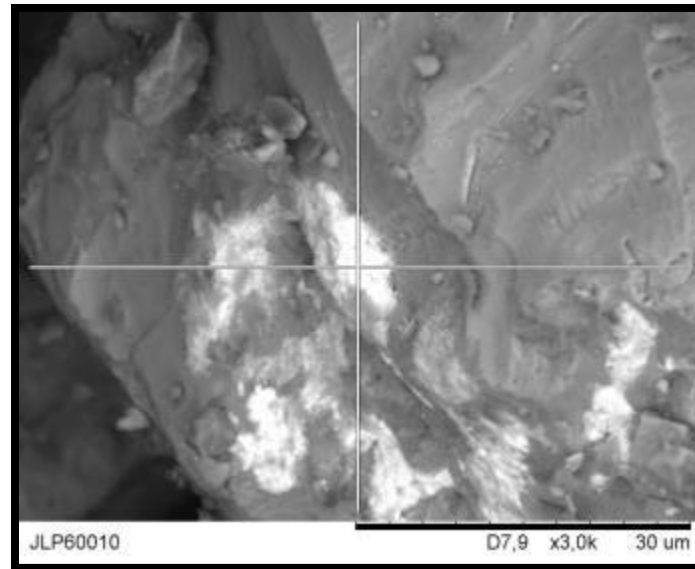


Figura 5.65. Punto de interés a analizar.

Como resultado se obtuvieron espectros con los que el software pudo identificar los minerales contenidos en la muestra (Figura 5.66).

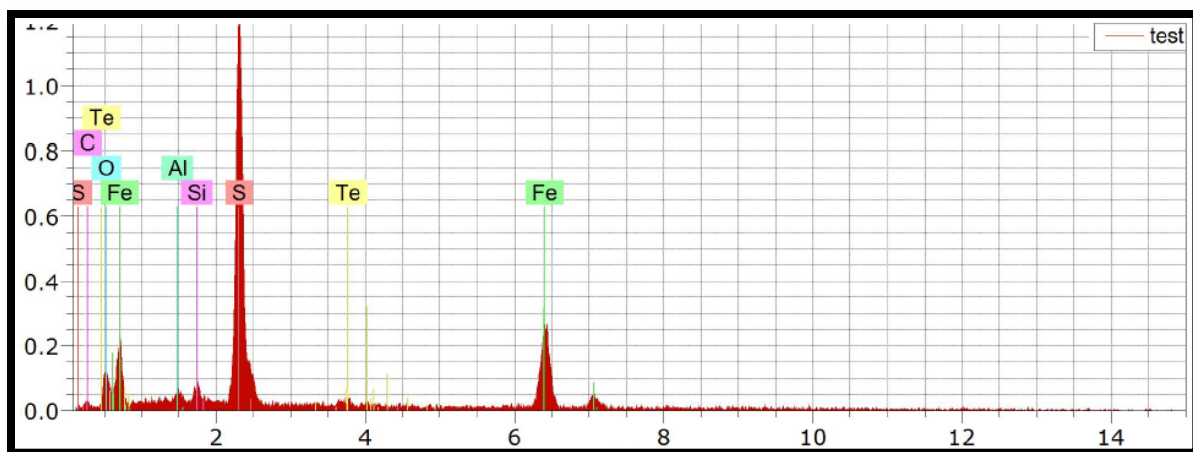


Figura 5.66. Gráfica de resultados de una partícula de la muestra JLP6

Para este ejemplo, específicamente esta partícula de la muestra JLP6 presentó el siguiente contenido:

- Azufre (S)
- Hierro (Fe)
- Oxígeno (O)
- Silicio (Si)
- Aluminio (Al)
- Carbono (C)
- Telurio (Te)

Los espectros permitieron determinar qué compuestos se encontraron presentes, del ejemplo se llegó a la conclusión de que se tiene presente cuarzo (SiO_2), carbonato de hierro (FeCO_3), carbonato de aluminio $\text{Al}_2(\text{CO}_3)_3$, pirita (FeS_2) y pirrotita ($\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$). Sin embargo, esto se pudo analizar por la técnica de difracción de rayos x para comprobación y un análisis más a detalle.

5.5.5 Determinación de metales pesados

El análisis para determinar el contenido de metales en las muestras de jales se realizó en el laboratorio de la empresa Minera y Beneficiadora Purísima S.A. de R.L. por medio de la técnica de espectrofotometría de absorción atómica, en donde se analizaron cinco metales: plata, plomo, zinc, cobre y el hierro, considerando un duplicado elegido aleatoriamente.

Los resultados de dicho análisis se presentan en el Capítulo 6.5.

6. Resultados y discusión

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos de la prueba estática y de la prueba cinética, así como el análisis de los mismos.

6.1 Resultados de la prueba estática

En virtud de que se dispuso del potencial de neutralización (PN) y del potencial de acidez (PA), fue posible calcular el cociente de ambos potenciales (Tabla 6.1) y así estimar si las muestras eran o no generadoras de drenaje ácido de acuerdo al criterio de la NOM-141-SEMARNAT-2003, que establece:

En caso de que la relación potencial de neutralización y el potencial de acidez sea menor a 1.2, se consideran generadores potenciales de ácido.

Por otra parte, la NOM-157-SEMARNAT-2009, expresa:

- Si $PN/PA \leq 3$; los jales son potenciales generadores de drenaje ácido.
- Si $PN/PA > 3$, los jales no son potenciales generadores de drenaje ácido.
- Si $1 > PN/PA \leq 3$, el generador podrá optar por realizar la prueba de laboratorio sobre intemperización de materiales sólidos.

Tabla 6.1. Estimación de la generación de drenaje ácido de acuerdo al criterio establecido en la NOM-157-SEMARNAT-2009 para cada una de las muestras. DAM: Drenaje Ácido de Mina.

Muestra	Profundidad (cm)	PN	PA	PN/PA	Criterio	Calificación
JLP1	30	327.3691	70.7481	4.6273	>3	No genera DAM
JLP2	80	200.5895	74.1161	2.7064	≤ 3	Genera DAM
JLP3	130	222.4110	172.9828	1.2857	≤ 3	Genera DAM
JLP4	180	549.1676	103.2753	5.3175	>3	No genera DAM
JLP5	390	199.4202	72.5649	2.7482	≤ 3	Genera DAM
JLP6	300	88.2412	69.0813	1.2774	≤ 3	Genera DAM
JLP7	110	157.4292	98.2334	1.6026	≤ 3	Genera DAM
JLP8	120	373.6753	118.1473	3.1628	>3	No genera DAM
JLP9	30	335.9664	84.8916	3.9576	>3	No genera DAM
JLP10	55	423.2077	131.9625	3.2070	>3	No genera DAM
JLP11	30	1641.0859	21.3728	76.7840	>3	No genera DAM
JLP12	30	209.6661	167.4767	1.2519	≤ 3	Genera DAM
JLP13	50	286.2357	75.5681	3.7878	>3	No genera DAM

6.2 Análisis de los resultados de la prueba estática

Con base en los resultados obtenidos y durante el desarrollo de la prueba se observó que las muestras, independientemente del lugar y de la profundidad de la extracción, tuvieron un contenido alto de carbonato de calcio.

Al inicio de la prueba se presentó un alto grado de efervescencia del ácido en contacto con las muestras, siendo reacciones de moderadas a fuertes, lo que permitió aseverar el gran contenido de carbonatos de calcio presentes en cada muestra. La muestra seis registró el menor efecto al agregar ácido a la muestra, ésta fue extraída a una profundidad de 300cm de la superficie y su coloración fue rojiza, demostrando la oxidación de los sulfuros contenidos en dicha muestra.

De acuerdo a la NOM-141-SEMARNAT-2009 y dado que todas las muestras presentaron un valor mayor a 1.2 en la relación del potencial de neutralización y el potencial de acidez se calificarían a las muestras como no generadoras de drenaje ácido, con lo que finalizaría el estudio.

Por otra parte, de acuerdo con el criterio establecido en la NOM-157-SEMARNAT-2009, seis de las trece muestras analizadas se calificaron como no generadoras de drenaje ácido, coincidiendo con la NOM-141-SEMARNAT-2003. Sin embargo, las otras seis muestras se encontraron en el ámbito que establece la NOM-157-SEMARNAT-2009 para que el responsable, en este caso la empresa, pudiera realizar una prueba cinética para comprobar si realmente se generaría o no el drenaje ácido. En esta investigación se sometieron las trece muestras a la prueba cinética para confirmar la prueba estática, además de valorar dicha prueba.

6.3 Análisis de los resultados de la prueba de análisis mineralógico

Los resultados del análisis mineralógico (Anexo D) mediante la técnica de difracción de rayos x permitieron confirmar lo obtenido en la prueba estática. Las muestras presentaron minerales con un alto contenido de calcita (CaCO_3), por mencionar como uno de los principales minerales presentes en el total de las muestras, en donde la calcita funciona como elemento neutralizador de la generación de acidez (Figura 6.1). Se presenta una gráfica comparativa de los espectros de cuatro muestras de diferentes presas y a diferentes profundidades en donde se aprecia claramente que los resultados son similares en cuanto al contenido de los minerales.

Debido a la confirmación de contenido de sulfuros metálicos en las muestras, se requiere continuar con el siguiente paso de la metodología de análisis en laboratorio para estimar la generación de drenaje ácido en las muestras con mayor contenido de dichos sulfuros.

Los resultados de la difracción de rayos x indican que hay una cantidad de minerales que neutralizan la acidez, principalmente la presencia de calcita.

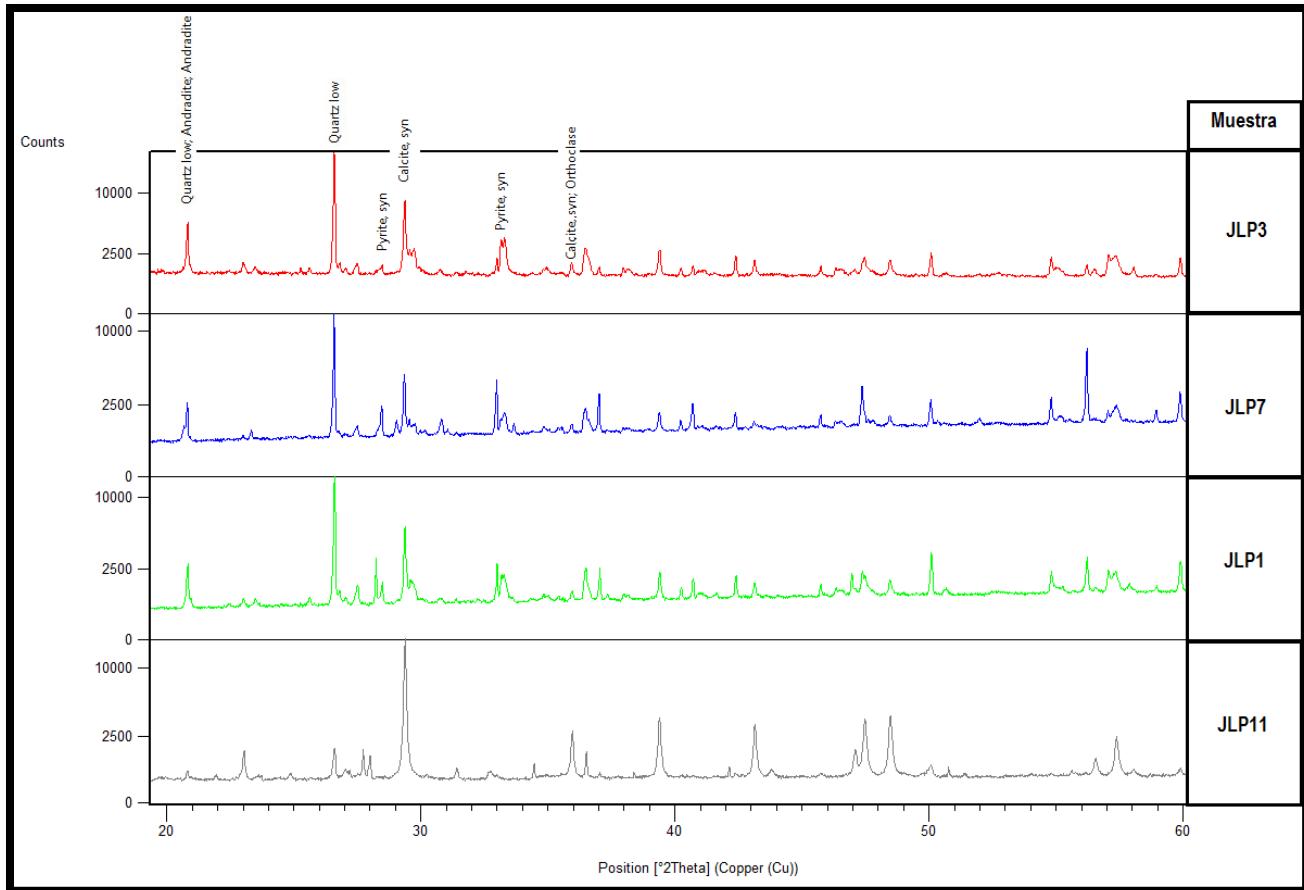


Figura 6.1. Comparativa de los espectros que se obtuvieron como resultado del análisis de las muestras JLP3, JLP1, JLP7 y JLP11.

6.4 Resultados de la Microscopía Electrónica de Barrido

Los resultados de la Microscopía Electrónica de Barrido (Anexo E) permitieron confirmar los resultados de las pruebas estáticas y de las pruebas cinéticas. En todas las muestras de jal se encontraron partículas con cierto contenido de elementos como Azufre (S), Hierro (Fe), Oxígeno (O), Aluminio (Al), Carbono (C), Sodio (Na), entre otros, siendo los de mayor presencia el Silicio (Si) y el Calcio (Ca). Esto explica la capacidad tan grande de neutralización de acidez que presentan las muestras de los residuos mineros analizados y que se ve reflejado en todas las pruebas y en los análisis como una estabilidad de no producir un drenaje ácido.

6.5 Resultados de la prueba cinética

En la Tabla 6.2 se presentan los resultados obtenidos de la prueba cinética de la muestra JLP12. Se seleccionó esta muestra en específico de acuerdo con los resultados obtenidos en la prueba estática, ya que fue la que presentó el menor valor conforme al criterio que establece la normativa en el balance de potencial de neutralización y potencial de acidez, presentando mayor cantidad de sulfuros metálicos. Los resultados completos se presentan en el Anexo F.

Tabla 6.2. Resultados de pH, conductividad eléctrica, temperatura, fecha y hora de la aplicación del lavado, registro de volúmenes de entrada y salida y la alcalinidad del lixiviado de la muestra JLP12, la cual se extrajo a una profundidad de 30cm de la presa número 5.

Muestra JLP12								
Tiempo	pH	CE (μS/cm)	T (°C)	Fecha	Hora	Volumen añadido (mL)	Volumen salida (mL)	Alcalinidad (mg/L)
Semana 0	8.22	1009	21.2	14/07/2015	10:30	200	74	
Semana 1	7.75	1673	20.7	21/07/2015	10:30	100	81	
Semana 2	7.21	1516	20.2	28/07/2015	10:30	100	78	
Semana 3	7.90	1274	22.2	04/08/2015	10:30	100	76	
Semana 4	7.99	1169	20.3	11/08/2015	10:30	100	75	
Semana 5	7.45	1163	21.0	18/08/2015	10:30	100	93	
Semana 6	7.30	1137	20.2	25/08/2015	10:30	100	83	
Semana 7	7.01	1220	20.0	01/09/2015	10:30	100	77	
Semana 8	6.48	1178	21.7	08/09/2015	10:30	100	75	
Semana 9	7.83	1264	20.5	15/09/2015	10:30	100	95	
Semana 10	7.75	1253	21.4	22/09/2015	10:30	100	74	
Semana 11	7.83	1026	18.8	29/09/2015	10:30	100	73	
Semana 12	7.91	711	20.8	06/10/2015	10:30	100	97	
Semana 13	8.16	466	21.4	13/10/2015	10:30	100	75	80
Semana 14	7.98	380	18.0	20/10/2015	10:30	100	74	96
Semana 15	8.30	275	20.0	27/10/2015	10:30	100	97	76
Semana 16	8.41	315	23.4	03/11/2015	10:30	100	74	100
Semana 17	8.28	326	19.0	10/11/2015	10:30	100	80	132
Semana 18	8.32	340	20.3	17/11/2015	10:30	100	74	122
Semana 19	7.94	311	18.8	24/11/2015	10:30	100	81	108
Semana 20	7.91	342	18.1	01/12/2015	10:30	100	96	136

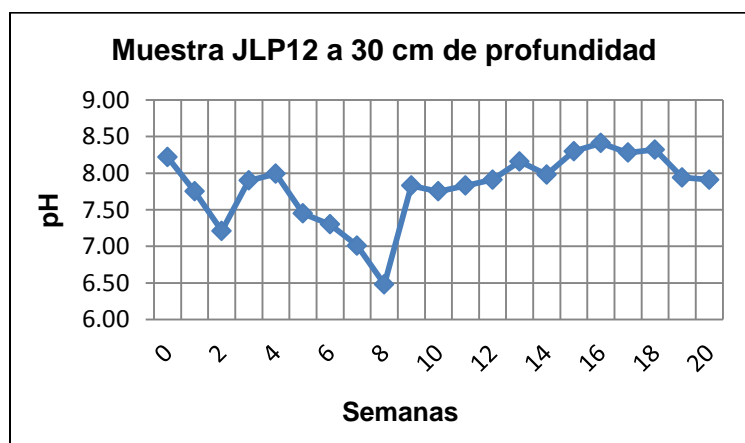


Figura 6.2. Gráfica de pH de la muestra JLP12

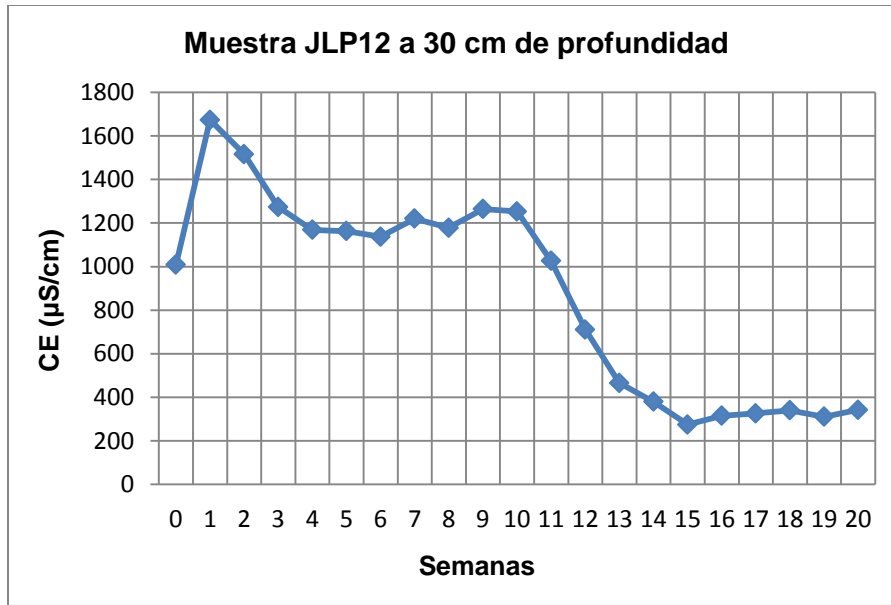


Figura 6.3. Gráfica de conductividad eléctrica de la muestra JLP12

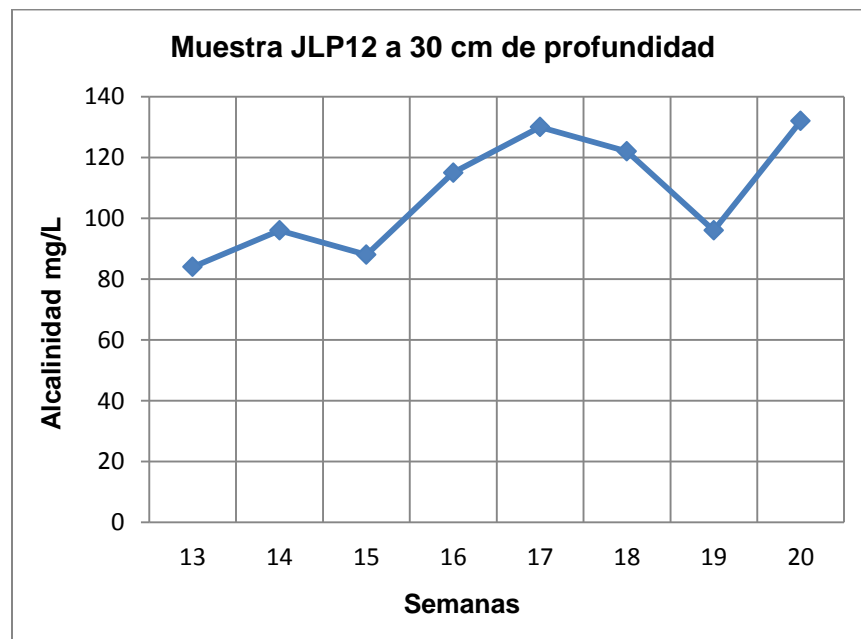


Figura 6.4. Gráfica de alcalinidad de la muestra JLP12

Se realizó un análisis comparativo de diferentes muestras con la finalidad de observar su comportamiento a lo largo de la duración de la prueba.

Las Figuras 6.5, 6.6 y 6.7 indican las gráficas comparativas entre los resultados de las muestras obtenidas de la presa de jales número 4: Y que al comparar presentaron una tendencia similar entre las muestras en los diferentes parámetros, manteniéndose en valores básicos de pH, lo que permitió confirmar los valores registrados en la prueba estática.

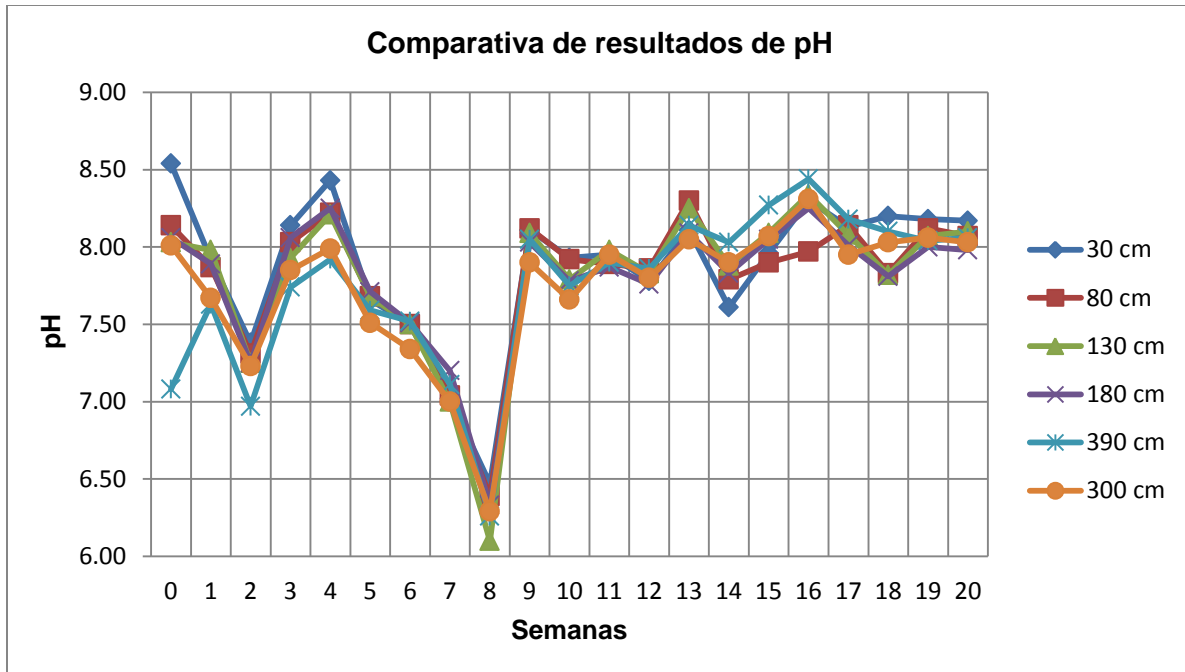


Figura 6.5. Gráfica comparativa de pH de las muestras JLP1, JLP2, JLP3, JLP4, JLP5 y JLP6, respectivamente, extraídas de la presa de jales número 4.

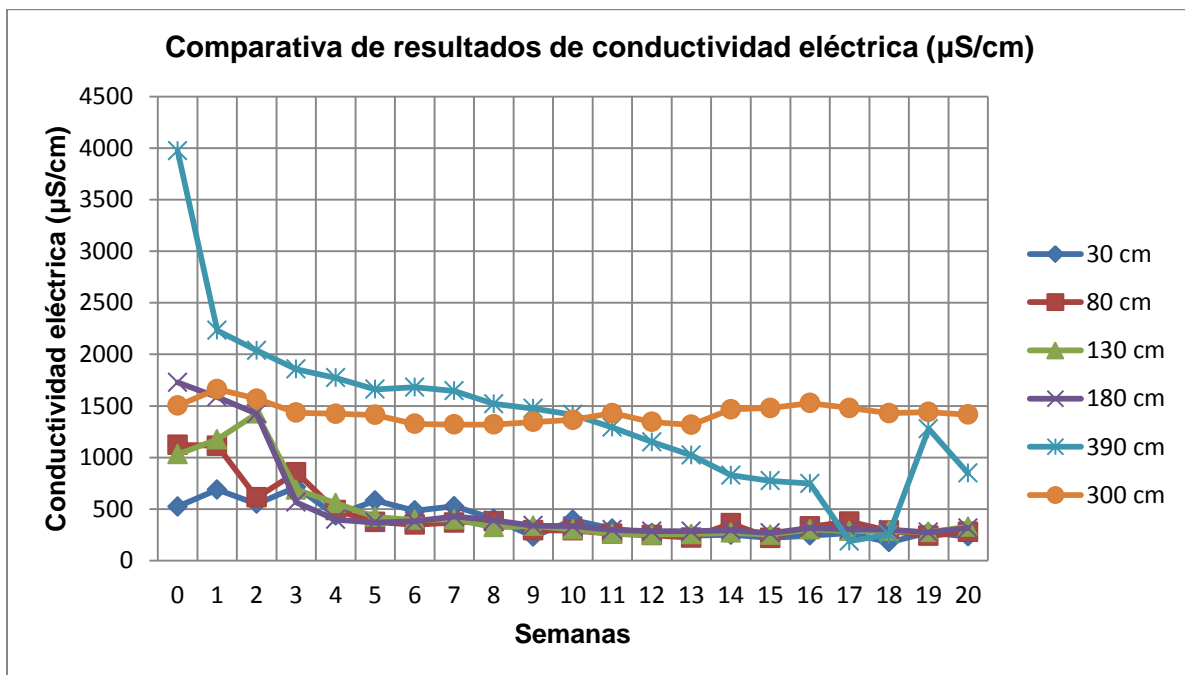


Figura 6.6. Gráfica comparativa de conductividad eléctrica de las muestras JLP1, JLP2, JLP3, JLP4, JLP5 y JLP6, respectivamente, extraídas de la presa de jales número 4.

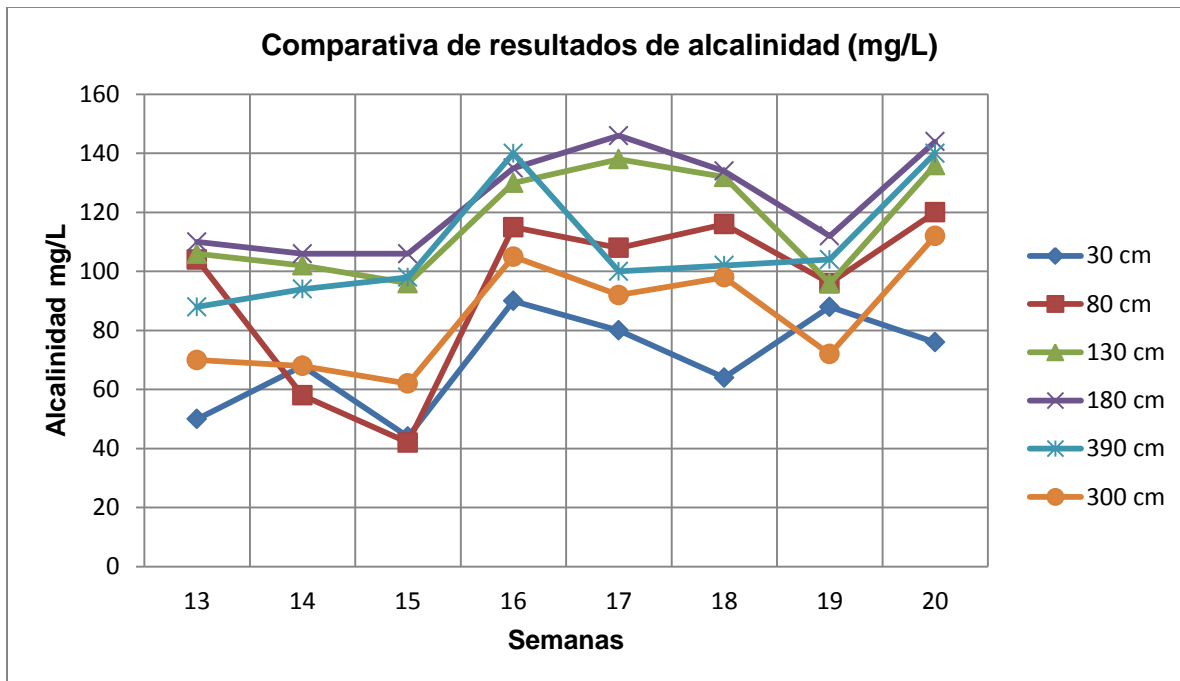


Figura 6.7. Gráfica comparativa de alcalinidad de las muestras JLP1, JLP2, JLP3, JLP4, JLP5 y JLP6, extraídas de la presa número 4.

6.6 Análisis de resultados de la prueba cinética

De acuerdo a los resultados obtenidos en cada una de las muestras (ver Anexo F), después de las 20 semanas, se observó un comportamiento similar en las 13 muestras con respecto al potencial Hidrógeno (pH), con una tendencia a lo estable. Iniciando con un pH básico y decreciendo conforme pasó el tiempo, sin alcanzar acidez suficiente para la generación de drenaje ácido, para finalmente mantenerse en un pH alcalino.

Los resultados de la conductividad eléctrica muestran un decremento a lo largo de la prueba cinética, esto puede ser explicado por el bajo contenido de sulfuros metálicos como la pirita, esfalerita y galena, los cuales han sido reportados como minerales conductores de electricidad (Citado por Pérez, 2015, extraído de Campbell y Fitterman, 2000) o porque no se liberaron importantes cantidades de sulfatos.

En el caso de la alcalinidad, las muestras presentaron un alto contenido de carbonatos de calcio, como se demostró en la prueba estática.

En virtud de los anterior, se confirmaron los resultados de la prueba estática manifestándose el alto contenido de carbonatos, lo cual neutraliza la acidez y no propició la generación de drenaje ácido en ninguna de las muestra.

A su vez, se observó que la profundidad de las muestras específicamente en este estudio no influyó en la generación de acidez, mostrando una tendencia a estabilizarse con el paso del tiempo en estos jales. Es pertinente mencionar, que la profundidad en otras presas sí puede influir en la generación de drenaje ácido debido a que en diferentes temporadas el proceso de beneficio cambia, así como

también el origen de la roca, siendo de mayor o menor contenido de sulfuros metálicos, por lo que la acción sinérgica de todos los factores que propician la acidez puede o no presentarse.

6.7 Resultados del contenido de metales pesados

El análisis del contenido de metales pesados en las muestras fue realizado por la Compañía Minera y Beneficiadora Purísima S. de R.L. en su laboratorio y se presentan en la Tabla 6.3. Los minerales analizados estuvieron sujetos a la disposición de la empresa minera.

Tabla 6.3. Resultados de la determinación de metales en las muestras de residuos mineros

Muestra	Descripción	Profundidad de muestreo (cm)	Ensayes, determinación de metales				
			Ag (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Fe (mg/kg)
JLP1	Coloración gris	30	36	2,600	5,400	600	145,300
JLP2	Coloración gris	80	22	1,300	2,600	500	163,500
JLP3	Coloración gris	130	20	1,200	1,500	400	13,4500
JLP4	Coloración gris	180	38	3,200	4,300	600	86,100
JLP5	Coloración gris	390	46	2,200	2,000	200	215,200
JLP6	Coloración rojiza	300	54	2,600	3,500	600	278,200
JLP7	Coloración gris	30	32	1,600	7,200	1,100	173,100
JLP7	Coloración gris, duplicado	30	30	1,600	7,200	1,100	182,200
JLP8	Coloración gris	120	110	1,500	4,400	400	108,700
JLP9	Coloración gris	30	30	2,600	4,000	400	124,400
JLP10	Coloración gris	55	26	1,900	3,800	1,200	118,200
JLP11	Coloración café, extraída afuera de las presas de jales	30	16	4,800	1,100	200	12,500
JLP12	Coloración gris	30	36	2,200	1,800	500	220,900
JLP13	Coloración gris	50	34	2,200	6,000	500	141,100

6.8 Análisis de resultados del contenido de metales pesados

Las concentraciones totales de los elementos potencialmente tóxicos (EPT) analizados, varían en un amplio intervalo. En términos de valores promedio, las concentraciones totales de metales son mayores en las muestras de jal que en la muestra testigo. Además la muestra JLP6, la cual presentó coloración rojiza no muestra variación importante con las demás muestras.

7. Propuestas para la estimación de drenaje ácido

En este capítulo se presenta la utilidad de la prueba cinética de celdas húmedas para la estimación de drenaje ácido, así como propuestas metodológicas, tanto de muestreo como de análisis en laboratorio. Asimismo, se proponen recomendaciones para remediar suelos contaminados con residuos mineros en los que se estime que generen drenaje ácido con el paso del tiempo.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente estudio, se sugiere no realizar las pruebas de celdas de humedad una vez que en los resultados de la prueba estática de balance ácido base el valor del cociente del potencial de neutralización y el potencial de acidez resulte entre 1 y 3. Esto debido a que al someter las muestras a dicha prueba cinética a lo largo de 20 semanas, los resultados muestran tendencia a la estabilización, confirmando a la prueba estática.

7.1 Propuesta de una metodología de muestreo

Se propone el apoyo de la NMX-AA-132-SCFI-2006, la cual es referida a muestreo de suelos contaminados para el muestreo de jales, a falta de un criterio objetivo en la normativa aplicable a dichos residuos mineros sobre el procedimiento de muestreo de jales distribuidos en las presas durante la operación del beneficio de minerales. Es pertinente mencionar que el diseño del muestreo está en función de las características de la roca y del proceso de separación de los minerales de interés de la empresa.

La metodología debe precisar el número de muestras necesarias para que el muestreo sea representativo del sitio en estudio. Se destaca la importancia de la obtención de muestras a diferentes profundidades, ya que la estratificación de los residuos mineros cambia a lo largo del tiempo por la modificación en el proceso de beneficio. Esto se debe al cambio de los reactivos o de todo el proceso de separación de los minerales de interés y que puedan propiciar a la oxidación de los minerales productores de acidez.

7.2 Propuesta de una metodología de análisis de laboratorio

Se propone utilizar la metodología desarrollada por la Universidad Politécnica de Cataluña (Figura 4.5), la cual propone realizar un análisis mineralógico como estudio secundario que permita valorar cualitativamente el contenido de minerales generadores de acidez y el contenido de minerales neutralizadores de acidez. Adicionalmente, dicha metodología propone realizar un análisis semicuantitativo de la composición química de las muestras de jales por medio de la técnica de microscopía electrónica de barrido. Asimismo se propone no utilizar la prueba de celdas de humedad como parte del procedimiento de análisis en laboratorio de acuerdo con los resultados obtenidos en la presente tesis.

Esto permitirá descartar, conforme se avanza en las etapas del estudio, que ciertos residuos mineros puedan estimarse como no generadores de drenaje ácido. Dicho procedimiento ahorra tiempo y costos en este tipo de estudios. Además, se puede valorar de mejor manera si el residuo producirá o no

drenaje ácido, para así prever las medidas de control de la contaminación, que involucre más esferas ambientales o una remediación del impacto ambiental en su caso. Se recomienda efectuar este tipo de estudios en todos y cada uno de los sitios donde se encuentren en operación los procesos de beneficio, además de lo establecido en la normativa aplicable.

7.3 Recomendaciones

Propuesta de remediación de suelos contaminados con residuos mineros en los que se estime la generación de drenaje ácido.

Como propuesta de remediación de suelos contaminados con residuos mineros que presenten características favorables para la generación de drenaje ácido, se recomienda la colocación o la adición de material, roca o residuos con un alto contenido de carbonato de calcio para garantizar la estabilización de una posible generación de drenaje ácido.

La remediación debe realizarse tanto en sitios que se encuentran como pasivos ambientales, como en las presas de jales y que al ser mezclados con minerales con niveles altos para neutralizar la acidez entren en contacto directo con aquellos que producen acidez y se neutralicen evitando que en el futuro se pueda liberar dicha acidez.

8. Conclusiones

Se cumplió el objetivo planteado para este estudio. Concluyendo que no es requerida la aplicación de la prueba cinética de celdas húmedas de acuerdo con los resultados obtenidos en el presente estudio. Los cuales confirmaron los resultados de la prueba estática.

Se confirmó la hipótesis planteada en la investigación, ya que la prueba de celdas de humedad no es necesaria para confirmar la prueba estática, porque no aporta información diferente, ya que únicamente confirma los resultados del balance ácido base de las muestras de jal.

Los resultados de las prueba de pH en pasta, estática y cinética; los análisis mineralógicos y químicos coincidieron en que los jales presentan suficiente contenido de carbonato de calcio (CaCO_3) el cual neutraliza la generación de drenaje ácido e impide que éste se transporte a otras esferas ambientales.

Los resultados de la prueba cinética además de confirmar la predicción de la prueba estática y los análisis semicualitativos realizados en el estudio, confirman que dicha prueba cumple el objetivo de simular el intemperismo de manera acelerada, de acuerdo con las reacciones de las muestras durante las 20 semanas que duró la prueba. Al comparar los resultados de las muestras obtenidas en las presas de jales con los resultados de la muestra que no se sometió a la prueba, se observó la influencia de la mezcla de aire y CO_2 húmedo en el proceso de oxidación de los minerales presentes.

No se observó ninguna influencia importante de la estratificación de las muestras verticales de jal a lo largo de la prueba cinética y en los diferentes estudios. Sin embargo, es importante mencionar que si influyeron las características propias del yacimiento mineral del cual es extraída la roca para el proceso de beneficio.

El proceso de beneficio puede cambiar a lo largo del tiempo, así como también puede cambiar el origen de la roca, la cual puede contener mayor o menor cantidad de minerales generadores de acidez y dicha producción de ácido se puede presentar en distintas profundidades. Es por ello, que se propone el apoyo de la NMX-AA-132-SCFI-2006 para llevar a cabo el procedimiento de muestreo de jales en el vaso de las presas.

El estudio permitió conocer los elementos que intervienen en el proceso de formación de drenaje ácido en los residuos mineros, así como aprender y aplicar las pruebas y los análisis en laboratorio que permitieron estimar una posible producción de drenaje ácido. El trabajo tiene la finalidad de presentar un sustento técnico que permita servir de apoyo en una posible mejora a la normativa existente en México para el bienestar de las esferas ambientales y las personas.

9. Referencias

- Baker, B.J. and Banfield, J.F., 2003. Microbial communities in acid mine drainage. *FEMS Microbiology Ecology* 44, 139-152.
- Campbell, D., Fitterman D., 2000, Geoelectrical methods for investigating mine dumps, en *Proceedings of the Fifth International Conference on Acid Rock Drainage, Inc. Denver Colorado, Society for Mining, Metallurgy and Exploration*
- CAMIMEX, 2014, Informe annual, 2015, Cámara Minera de México.
- Cortinas, C. 2007. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [En línea], 27 de Agosto de 2007 [Citado el 02 de Diciembre de 2014]. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/gacetas/155/cortinas.html>
- Csuros, M. and Csuros, C., 2002. *Environmental sampling and analysis for metals*. Lewis Publisher. 372 pp.
- Dold, B. and Fontbote, L., 2001. Element cycling and secondary mineralogy in porphyry copper tailings as a function of climate, primary mineralogy, and mineral processing. *Journal of Geochemical Exploration* 74, 3–55.
- Dold, B. 2005. Basic concepts in environmental geochemistry of sulfide mine-waste. En: *Mineralogía, geoquímica y geomicrobiología para el manejo ambiental de desechos mineros. XXIV Curso Latinoamericano de Metalogenia*, 22 (pp. 1-36). Lima, Perú: UNESCO-SEG.
- EPA. 1986. Method 9038 Sulfate (Turbidimetric), Environmental Protection Agency. Washington, DC. EEUU.
- EPA, 1994. Method 3005A. 530-R-94-036. Acid mine drainage prediction. Environmental Protection Agency. Washington, DC. EEUU.
- Estadística de la industria minero metalúrgica, México, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2015, Consultado el 27 de Mayo de 2015 en <http://cuentame.inegi.org.mx/impresion/economia/mineria.asp>
- Flores J. A., 2013, Pruebas estáticas y cinéticas para valuar peligrosidad de jales, Tesis profesional, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Gray, N.F., 1997. Environmental impact and remediation of acid mine drainage: a management problem. *Environmental Geology* 30, 62-71.
- Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Acido de Minas, (GAMDAM). Consultado el 15 de octubre de 2014, disponible en: <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/manedrenaje.PDF>
- Gobierno de Chile, 2002, Guía Metodológica sobre Drenaje Ácido en la Industria Minera, Secretaría de Economía, Consejo Nacional de Producción Limpia, Chile, 2002.

Gutiérrez R. M. E., 2007, Los Residuos en la Minería Mexicana. Instituto Nacional de Ecología. Instituto Nacional de ecología en línea, 15 de Noviembre de 2007. Consultado el 02 de Diciembre de 2014 en http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/35/los_residuos.html

La Jornada, 2015, Periódico La Jornada, a fecha de Domingo 20 de Septiembre de 2015, p. 5.

Lapakko, K., 2002. Metal Mine Rock and Waste Characterization Tools: An Overview. Mining, Minerals and Sustainable Development. Minnesota Department of Natural Resources, US. International Institute for Environment Development, World Business Council for Sustainable Development, 8, 9.

Lawrence, R.W. and Day, S., 1997. Chemical prediction techniques for ARD. In: Fourth International Conference on Acid Rock Drainage, Short Course #2. Vancouver, BC, 6-31.

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, Título primero, capítulo I, artículo 3º, fracción XXXIII.

Lin Z., 1997,. Mobilization and retention of heavy metals in mill-tailings from Garpenberg sulfide mines, Sweden. Science of The Total Environment, Volume 198, Issue 1. Environmental Geology, Institute of Earth Sciences, Uppsala University, Sweden.

López S. L. R., 2013, Residuos mineros y la generación de drenaje ácido: pruebas de laboratorio y su aplicación en el diseño, construcción y operación de depósitos, Tesis profesional, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Lottermoser, B.G., 2007. Mine Wastes: Characterization, treatment and environmental impacts. Springer 3th ed. Berlin Heidelberg, New York, 33-89, 179-204.

Maest, A.S., Kuipers, J.R., Travers, C.L. and Atkins, D.A., 2005. Predicting Water Quality at Hardrock Mines Methods and Models, Uncertainties, and State-of-the-Art. Kuipers & Associates and Buka Environmental. EARTHWORKS in Washington, DC, USA, 16-21, 26-32.

Manifestación de impacto ambiental, 2009, Compañía Minera y Beneficiadora Purísima, S de R. L.

Method 1627: Kinetic Test Procedure for the Prediction of Mine Drainage Quality, 2011, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. EEUU.

NMX-AA-132-SCFI-2006 “Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra”. Norma mexicana. Dirección General de Normas.

NMX-AA-036-SCFI-2001, “Método de prueba para la determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas”. Norma mexicana. Dirección General de Normas.

NMX-B-021-1982. Determinación de las Formas de Azufre en el Carbón. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. Norma mexicana. Dirección General de Normas.

NMX-B-400-1970. Método de análisis químico para la determinación gravimétrica de azufre en minerales de hierro. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. Norma mexicana. Dirección General de Normas.

NOM-052-SEMARNAT-2005: Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México D.F. México, 32 pp.

NOM-141-SEMARNAT-2003: Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción y operación y pots-operación de presas de jales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México D.F. México, 30 pp.

NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales en conjunto con la Secretaría de Salud, México D.F. México.

NOM-155-SEMARNAT-2007, Que establece los requisitos de protección ambiental para los sistemas de lixiviación de minerales de oro y plata. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México D.F. México, 27 pp.

NOM-157-SEMARNAT-2009, Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México D.F. México.

Parbhakar-Fox, Anita K., 2011, Development of a textural index for the prediction of acid rock drainage, Australia, ScienceDirect.

Pérez M., I., Romero F. M., 2015, Uso de parámetros indirectos para la evaluación de la contaminación de suelos por metales pesados en una zona minera de San Luis Potosí, México, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen 67, núm. 1

Salas M. E. F., 2014, Geoquímica y mineralogía de jales en mina Aurora, Xichú, Guanajuato, Tesis de maestría en Ciencias de la Tierra, UNAM

Sistema Meteorológico Nacional, SMN, consultado el 09 de junio de 2015: <http://smn.conagua.gob.mx/climatologia/Normales5110/NORMAL13044.TXT>

SEMARNAT, 2012. Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave y de desempeño ambiental edición 2012 [En línea]. [Citado el 02 de Diciembre de 2014]. http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/07_residuos/cap7_3.html

William A. Price, 2009, Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Materials, CANMET- Mining and Mineral Sciences Laboratories Smithers, British Columbia, 265-295

10. Anexos

10.1 Anexo A (Diseño de muestreo en México)

Diseño de muestreo en México

Una empresa de consultoría minera recomienda cerca de 8 - 12 muestras de cada tipo de roca significativo o 1 muestra por cada 1 millón de toneladas, como mínimo (Schafer, 1993).

En México se dispone de una norma que establece las especificaciones generales para realizar un muestreo de suelos cuyo contenido de metales y metaloides puede estar presente en el sitio de estudio. La norma se titula NMX-AA-132-SCFI-2006 "Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra".

Es importante apoyarse en un proceso sistemático que con la recopilación y revisión de información, como documentos, mapas y datos del sitio para determinar si los residuos mineros tienen potencial de generación de drenaje ácido, con el fin de determinar la técnica de muestreo que sea más representativa.

De acuerdo a la NMX-AA-132-SCFI-2006, el plan de muestreo consiste en lo siguiente:

Muestreo Exploratorio

El objetivo es obtener las muestras de suelo representativas para establecer la presencia de contaminación y en su caso la distribución horizontal de la misma, y valorar su posible migración vertical.

El procedimiento se realiza en dos fases, en la primera se toman muestras de suelo superficial y en la segunda donde se toman muestras en perfiles de suelo, llamado muestreo vertical.

Los requerimientos para el muestreo superficial que va de 0 cm a 5 cm de profundidad son:

Tipo de muestras: Simple, en cada punto de muestreo.

Número mínimo de puntos de muestreo: el indicado en la Tabla 10.1 en función de la superficie del sitio que se asume puede estar contaminado.

Distribución de los puntos de muestreo: se puede utilizar el muestreo a juicio de experto, o el muestreo sistemático de acuerdo con las especificaciones establecidas en los apéndices informativos A y C.

Para extensiones menores a 0.1 ha y mayores a 30 ha aplicar la fórmula siguiente:

$$Y = (X^{0.3}) \quad (11.71)$$

Donde:

Y es el número mínimo de puntos de muestreo, y

X es la superficie del suelo de la zona de estudio expresada en hectáreas.

Para el muestreo vertical:

Para valorar la migración vertical de contaminantes, se pueden utilizar excavaciones, que permitan el acceso de la persona que toma la muestra, o se pueden utilizar perforaciones para el hincado de un muestreador manual o mecánico que obtenga un núcleo que permita ver y muestrear el perfil del suelo.

Los requerimientos son:

Tipo de muestra: simple, para cada intervalo.

Número mínimo de pozos: el indicado en la Tabla 10.1, en función del área supuestamente contaminada.

Profundidad de los pozos: está determinada por la profundidad a la que se obtengan valores iguales o menores a las concentraciones de referencia, establecidas en las normas oficiales mexicanas aplicables; el fondo del pozo está limitado por la existencia de roca firme o material consolidado, o la aparición de la zona de saturación de agua.

Intervalos de muestreo: deben identificarse los diferentes horizontes que forman el suelo en función de su aspecto físico (color, textura, grado de compactación, entre otros). Para horizontes con espesor menor a 30 cm, debe tomarse una muestra de canal vertical abarcando todo el espesor del mismo. Para horizontes mayores a 30 cm deben tomarse tantas muestras de 30 cm como sean necesarias para cubrir el espesor total. Para profundidades mayores a 2 m el intervalo de muestreo deberá ser definido con su justificación correspondiente.

Distribución de los pozos: seguirá la misma metodología utilizada para la distribución de los puntos de muestreo, conforme al muestro superficial.

Muestreo sistemático

El muestreo se realizará por medio de una cuadrícula sobrepuesta a toda la superficie por estudiar y el tamaño de los cuadros es función del número de puntos de muestreo y de la superficie de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$C = \left(\frac{a}{n}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

C es la longitud de los lados de cada cuadro;

a es la superficie, y

n es el número de puntos de muestreo de acuerdo con la Tabla 10.1

La longitud de los cuadros se debe redondear hacia abajo, aun cuando el número de puntos de muestreo aumente; no hay que olvidar que el número de puntos de muestreo indicado en las tablas es mínimo y de acuerdo a las circunstancias locales se deben tomar muestras adicionales. Las muestras son tomadas en las intersecciones de la retícula de la cuadrícula.

Tabla 10.1. Muestreo exploratorio.

Superficie del sitio que se supone contaminado (Hectáreas)		Número mínimo de puntos de muestreo	Número mínimo de pozos verticales
De	A		
0.1	0.19	6	1
0.2	0.29	7	1
0.3	0.39	8	2
0.4	0.49	9	2
0.5	0.69	10	2
0.7	0.99	11	2
1	1.99	12	2
2	2.99	14	3
3	3.99	16	3
4	4.99	18	4
5	5.99	19	4
6	6.99	20	4
7	7.99	21	4
8	8.99	22	4
9	10.99	23	5
11	11.99	24	5
12	13.99	25	5
14	15.99	26	5
16	17.99	27	5
18	19.99	28	6
20	21.99	29	6
22	24.99	30	6
25	27.99	31	6
28	29.99	32	6

La NOM-141-SEMARNAT-2003, en la sección 5 del anexo normativo 1, menciona lo siguiente referente al muestreo:

Para el desarrollo de la evaluación de la peligrosidad de los jales, se deben considerar los siguientes aspectos:

- Definición de las diferentes menas del yacimiento.
- Definición del proceso de beneficio.
- Manejo del jal en la presa.

Las muestras de jales aplicables para la evaluación pueden originarse de:

- Pruebas piloto en proyectos nuevos o de incorporación de nuevas reservas, o
- Muestras provenientes de la operación diaria de la planta de beneficio actual de la unidad minera.

Muestras provenientes de la evaluación del proceso en pruebas piloto en proyectos nuevos o de incorporación de nuevas reservas.

En proyectos de desarrollo minero y para la evaluación de la peligrosidad de un jal, se debe considerar la información obtenida de las pruebas metalúrgicas efectuadas a las muestras del proyecto tomadas para este fin. El número de muestras para las pruebas dependerá de la masa de las reservas de mineral del yacimiento expresadas en toneladas y su cálculo se basará en la gráfica de la Figura 1. Para la muestra final a evaluar se preparará un compósito de todos los jales producidos de las diferentes pruebas efectuadas de cada una de las diferentes menas del yacimiento.

Muestras provenientes de la operación diaria de una planta de beneficio.

Para el proyecto de nuevas presas de jales de minas en operación, la información requerida será obtenida del muestreo continuo de la descarga de la planta de beneficio en la cantidad necesaria para formar un compósito que permita la evaluación de la peligrosidad a partir de cada tipo de mena. El número de muestras por tipo de mena se calculará en función de sus reservas en toneladas y de acuerdo a la gráfica de la figura 5.

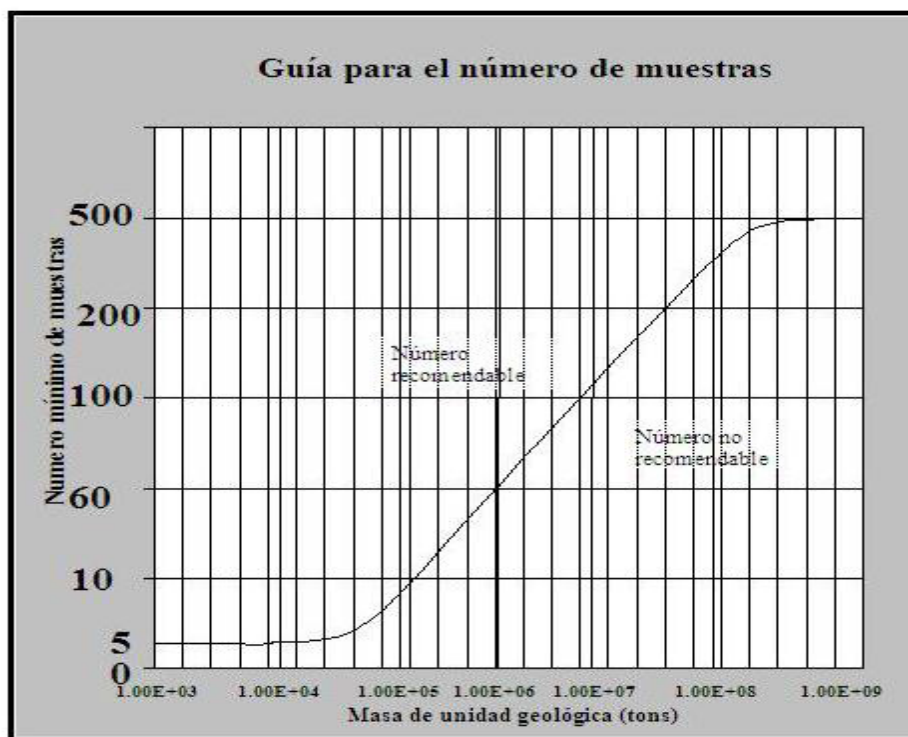


Figura 10.1. Guía para el número de muestras. Fuente: Bruce Downing, M. Sc., P. Geo. "Toma y preparación de muestras".

10.2 Anexo B (Diseño de muestreo en Canadá)

Diseño de muestreo en Canadá

El estado del arte y las buenas prácticas de diseño de muestreo empleadas en Canadá, país con desarrollo minero que tiene gran cantidad de empresas mineras con proyectos en México, se contrasta en el Manual de predicción para drenaje químico de materiales geológicos sulfurados. El capítulo 8 "Selección, almacenamiento y preparación de muestras" hace mención de cómo seleccionar las muestras:

El objetivo de la muestra en la selección, almacenamiento y la preparación es permitir el análisis o prueba de trabajo que indicará la magnitud y variabilidad significativa en las propiedades específicas de los materiales.

El lugar de muestreo dependerá de la información existente, tomando en cuenta la variabilidad de las propiedades y procesos específicos, requiriéndose exactitud y precisión.

La selección de los sitios de muestreo debe basarse en un buen conocimiento de la fianza. Antes del muestreo se debe identificar la ubicación de los materiales geológicos con diferencias notables en propiedades físicas, mineralogía, geoquímica, la erosión y la lixiviación, y los probables límites de los residuos y el mineral dentro las presas de jales. Antes de la extracción, el conocimiento del depósito puede provenir de una previa exploración, estudios geológicos regionales y de la línea base de trabajo ambiental.

El programa de muestreo debe incluir una buena representación espacial, geológica y geoquímica. La representación espacial de materiales geológicos se puede lograr mediante la recogida de muestras a intervalos regulares, intervalos en todo lo ancho y profundidad (horizontal y vertical) de las excavaciones propuestas. Una buena representación geológica y geoquímica del sitio puede requerir muestreos específicos adicionales (por ejemplo, aleatorio estratificado) para muestras con notable diferencia en sus propiedades físicas (por ejemplo, altamente fracturada), mineralógicas (por ejemplo, alteración mineral), a la intemperie (por ejemplo, oxidación) y lixiviación (por ejemplo, el enriquecimiento secundario) que puedan alterar el drenaje químico.

Se deben obtener suficientes muestras para caracterizar con precisión la variabilidad y tendencia central (por ejemplo, la media, la mediana y 10^o y 90^o percentiles) de los diferentes residuos materiales, componentes del proyecto y unidades geológicas.

A continuación se proporcionan sugerencias en cuanto a la frecuencia de muestreo inicial, ilustrando el enfoque por fases recomendado para el muestreo y también se proporciona orientación sobre el número inicial sugerido de muestras y trabajos de prueba (adaptado del Departamento de Industria, Turismo y Recursos, 2007 Gobierno de Australia):

Fase de exploración, para pruebas de prospección: por lo menos de 3 a 5 muestras representativas deben ser probados para cada tecla litología / tipo de alteración.

Fase de exploración, definición de recursos: al menos de 5 a 10 muestras representativas deben ser probadas para cada tecla litología / tipo de alteración.

Fase de pre-factibilidad: varios cientos de muestras representativas de mineral de alto y bajo grado; para el trabajo geoquímico se requiere roca estéril y relaves. Muestras suficientes para poblar un modelo de bloques con una distribución confiable de los datos de las pruebas estáticas en el mineral y los residuos. Para las pruebas cinéticas deben establecerse por lo menos 1-2 muestras representativas de cada tipo de litología o alteración clave.

La Tabla 10.2 proporciona una frecuencia de muestreo inicial sugerido basado en tonelaje de roca alterada cuando se muestrea una unidad geológica o un componente de la mina sin ninguna información antes de su uso como una guía. En el pasado, las frecuencias de muestreo de la Tabla 5 se han descrito incorrectamente como "la frecuencia de muestreo recomendado en la Columbia Británica", sin que indique que este es sólo un punto de partida sugerido y no es el número final requerido de muestras. La recomendación es que la frecuencia de muestreo final se determine

específicamente con base en la variabilidad de los resultados de análisis para los parámetros críticos, objetivos de predicción y precisión requerida.

Tabla 10.2. Frecuencia sugerida de muestreo inicial basado en el tonelaje durante el muestreo sin información previa (adaptado de BCAMDTF, 1989).

Unidad de tonelaje (toneladas métricas)	Número mínimo de muestras
<10000	3
<100000	8
<1000000	26
<10000000	80

La composición del material desde diferentes ubicaciones mejorará la predicción de la general tendencia central pero puede enmascarar la variabilidad significativa de sus propiedades como en la física, mineralogía, geoquímica, meteorización y lixiviación.

La masa de la muestra o volumen mínimo a coleccionar dependerá de los requisitos para el análisis y ensayo. Se requiere recolectar material adicional más allá del mínimo necesario o en caso de haber análisis adicionales, el trabajo de ensayo o requisitos de control de calidad (por ejemplo, replicar las pruebas).

La masa de la muestra inicial necesaria dependerá de si los análisis y trabajo de prueba se llevará a cabo en la muestra en su conjunto o en diferentes fracciones de tamaño de partículas, separados por tamizado.

Cuando el análisis y trabajo de prueba se lleve a cabo en diferentes fracciones de tamaño de partícula, la masa debe ser lo suficientemente grande para los análisis y en el trabajo de prueba el tamaño de la fracción de la masa es más pequeño. Por ejemplo, las muestras de residuos pueden ser de 10 kg o más para proporcionar 2 kg de la fracción del tamaño de partícula <2 mm.

Generalmente se necesitan 50 g para llevar a cabo una amplia lista de pruebas estáticas, siendo 1 kg la cantidad preferida. La masa mínima de material necesario para llevar a cabo una prueba de laboratorio cinética es al menos de 2 kg, con 3 kg de preferencia, además de la de 500 g como mínimo para pruebas estáticas que forman parte de futuras pruebas cinéticas. Para las pruebas cinéticas se requiere típicamente de masas más grandes, varios kilogramos a muchas toneladas en función del diseño de la prueba. (William A. Price, 2009).

10.3 Anexo C (Diseño de muestreo en Barcelona, España)

Diseño de muestre en Barcelona, España (Apuntes de la Dra. María Pura Alfonso Abella, Universidad Politécnica de Cataluña, Manresa, Barcelona, España).

El muestreo es una etapa de gran importancia en la evaluación de un depósito mineral. Las muestras deben ser representativas del lugar y presentar una cantidad suficiente para los posteriores análisis.

Las etapas de un muestreo de residuos de la minería se describen a continuación:

Etapa de investigación en la que se efectúa un muestreo.

El primer paso al planear el muestreo de un lugar es definir los objetivos, es decir, se planea de manera estratégica el reconocimiento del sitio de muestreo, así como el objetivo del estudio, las características a analizar de las muestras, la valoración del yacimiento mineral y el estudio de la actividad minera que se lleva a cabo.

Tipo de depósito mineral.

En esta fase se investiga el tipo de depósito mineral, es decir, conocer la disposición de los sulfuros metálicos en el depósito.

Distribución del mineral útil y su tamaño.

Es importante tomar en cuenta el tamaño de partícula de la muestra, ya que cuanto mayor sea éste más cantidad de muestra se necesitará para que sea representativa.

Tipo de muestreo.

Es necesario decidir el tipo de muestreo de acuerdo al objetivo del estudio, las características geológicas del yacimiento minero en el caso de una muestra de residuo minero para que sea representativa del sitio.

Errores en el muestreo.

Los errores en un muestreo pueden ocasionar que los resultados en las pruebas de laboratorio presenten interferencias o ya no sean representativos, de ahí la importancia de tener cuidado en no alterar a la muestra una vez que se efectúa la extracción.

Muestras de control.

Es importante contar con muestras testigo que deban ser tomadas en sitios alejados de la zona en estudio, pero deben tener las mismas características de las de interés.

Equipo y materiales en la toma de muestras.

La muestra debe ser tomada mediante el uso de equipo apropiado y limpio. Las muestras deben almacenarse en recipientes adecuados de acuerdo al tipo de análisis y deben etiquetarse inmediatamente.

Conservación de la muestra

Las muestras deben conservarse en un lugar adecuado, ya que muchas muestras tomadas para evaluar contaminantes tienen un tiempo de caducidad debido a que pueden ser volátiles. Después de este tiempo, los resultados de los análisis químicos tienen menor fiabilidad; en algunos casos, el

tiempo de caducidad puede extenderse añadiendo sustancias químicas o conservando la muestra en refrigeración.

10.4 Anexo D (Resultados del análisis mineralógico)

En este apartado se presentan los resultados del análisis mineralógico de nueve muestras realizado en la Universidad de Barcelona, Barcelona, España, no se analizaron el total de muestras debido a limitación con el presupuesto y el tiempo destinado en la estancia académica. Seleccionando dichas muestras de acuerdo a los resultados de la prueba estática.

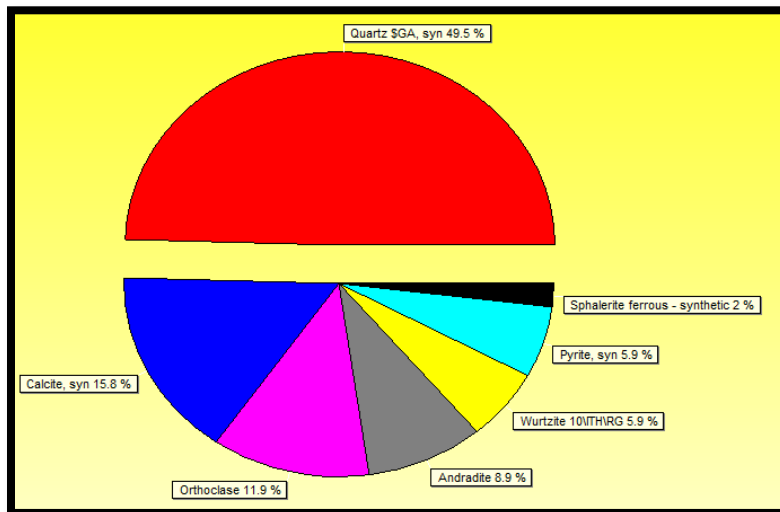


Figura 10.2. Gráfica de pastel del contenido mineral de la muestra llamada JLP1.

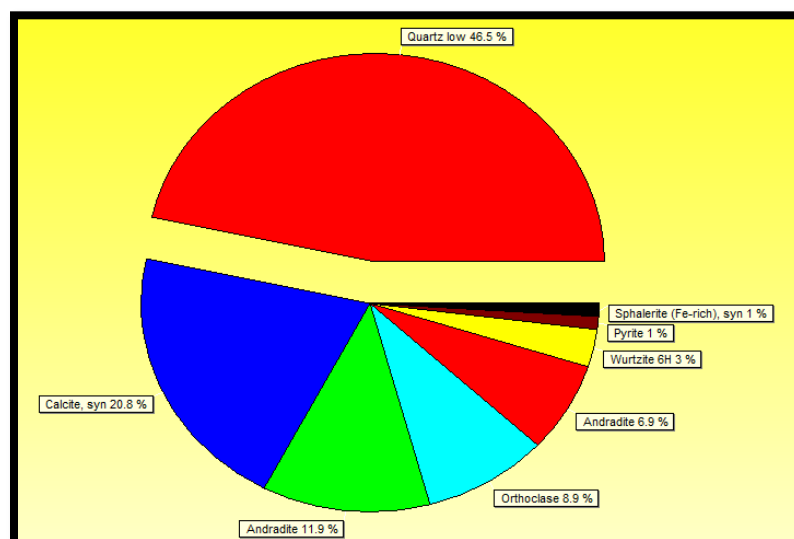


Figura 10.3. Gráfica de pastel del contenido mineral de la muestra llamada JLP3.

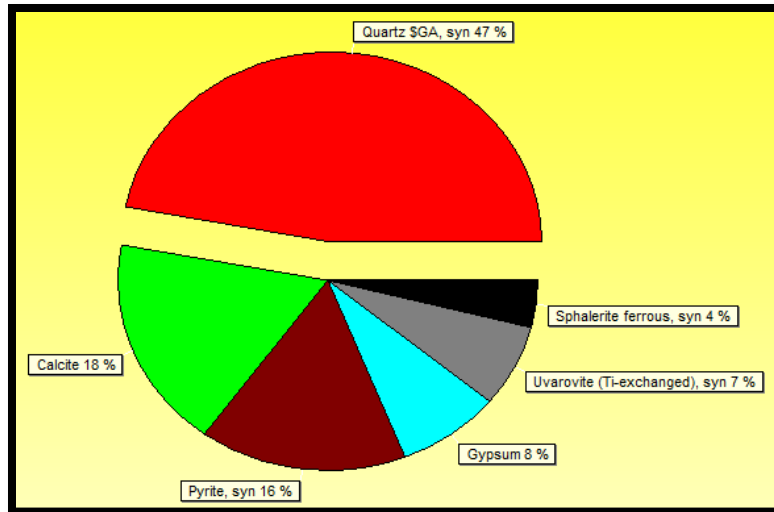


Figura 10.4. Gráfica de pastel del contenido mineral de la muestra llamada JLP5.

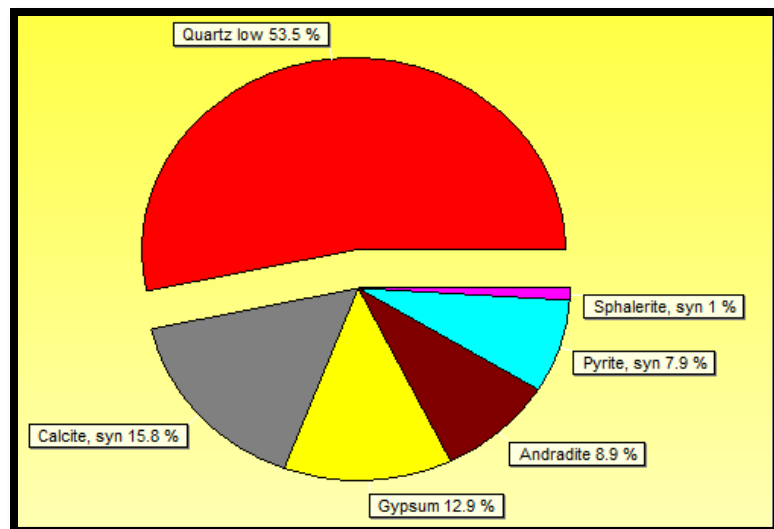


Figura 10.5. Gráfica de pastel del contenido mineral de la muestra llamada JLP7.

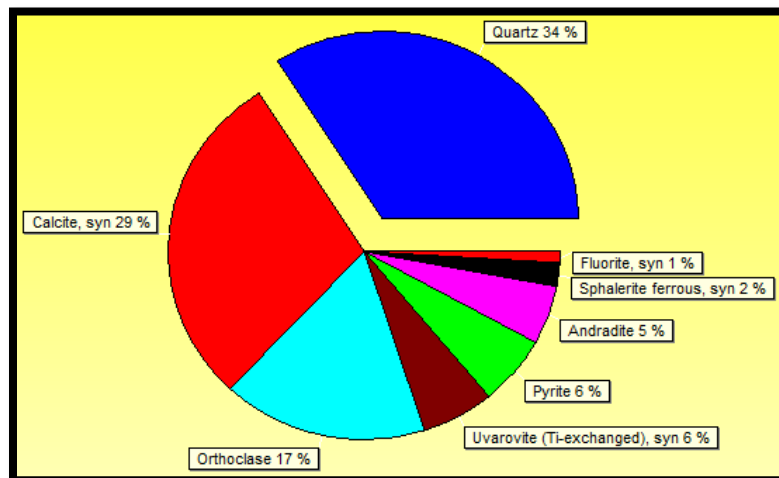


Figura 10.6. Gráfica de pastel del contenido mineral de la muestra llamada JLP8.

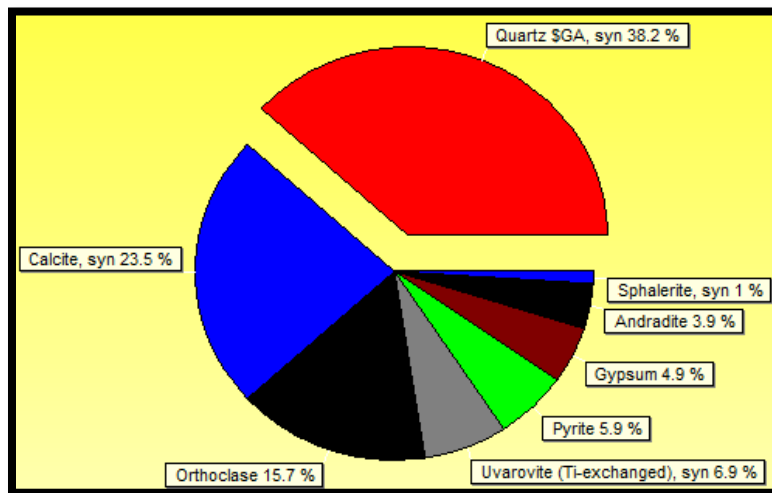


Figura 10.7. Gráfica de pastel del contenido mineral de la muestra llamada JLP9.

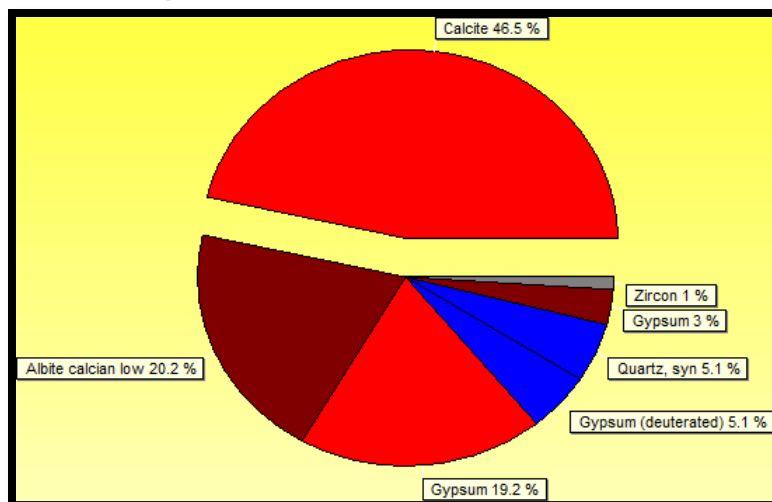


Figura 10.8. Gráfica de pastel del contenido mineral de la muestra llamada JLP11.

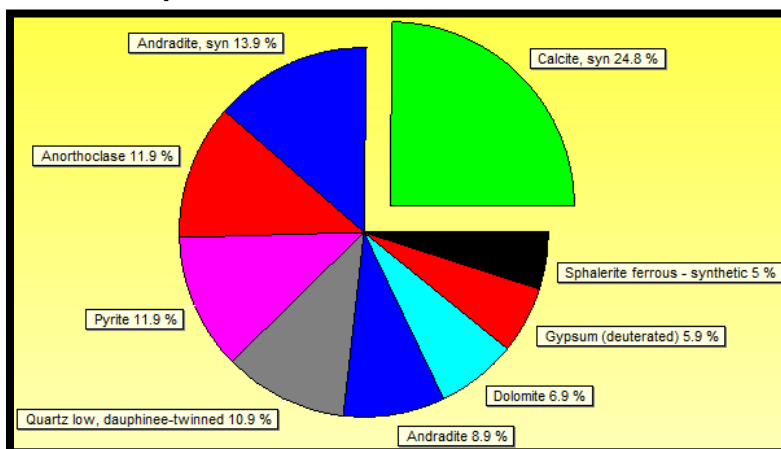


Figura 10.9. Gráfica de pastel del contenido mineral de la muestra llamada JLP12.

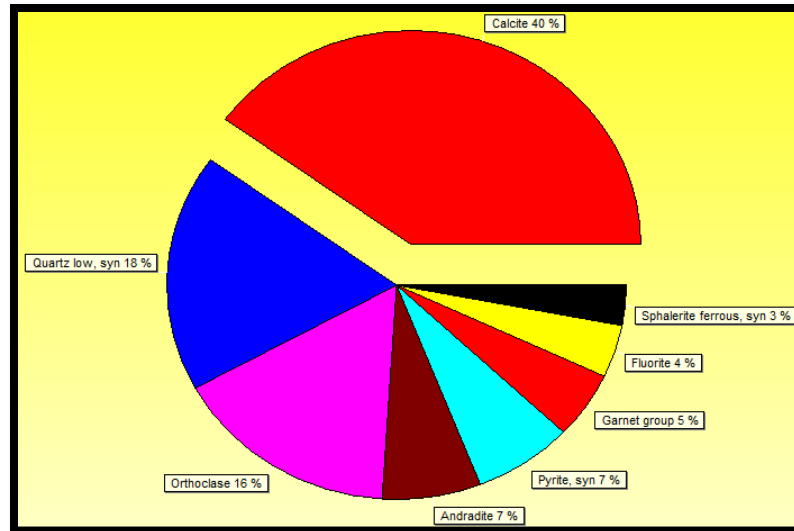


Figura 10.10. Gráfica de pastel del contenido mineral de la muestra llamada JLP2.

10.5 Anexo E (Resultados del análisis químico)

En este apartado se muestran los resultados obtenidos del análisis químico realizado en la Universidad Politécnica de Cataluña en Manresa, Barcelona, España. Es importante mencionar que se a continuación se presenta un resumen del análisis, ya que se debe analizar una gran cantidad de partículas de cada muestra, debido a que dichas partículas presentan diferente composición.

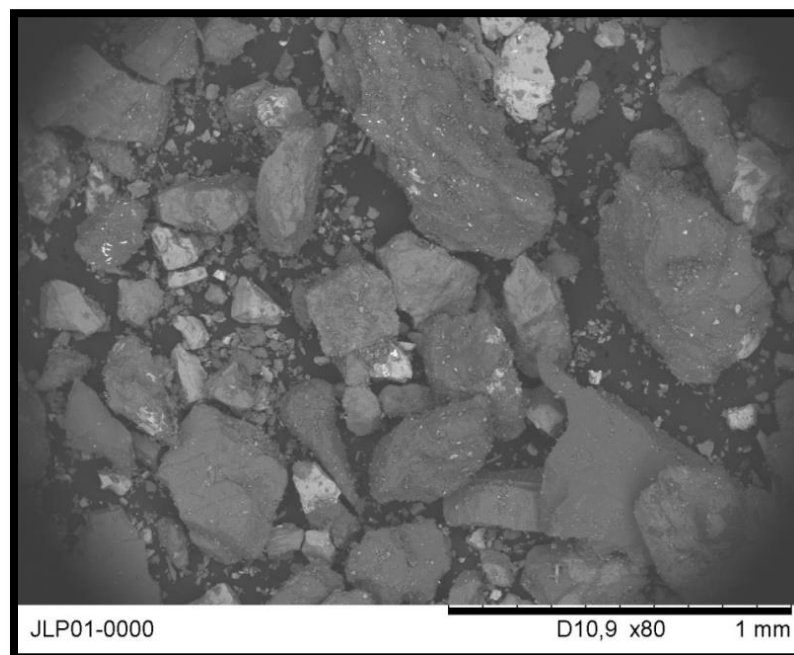


Figura 10.11. Partículas de la muestra JLP1.

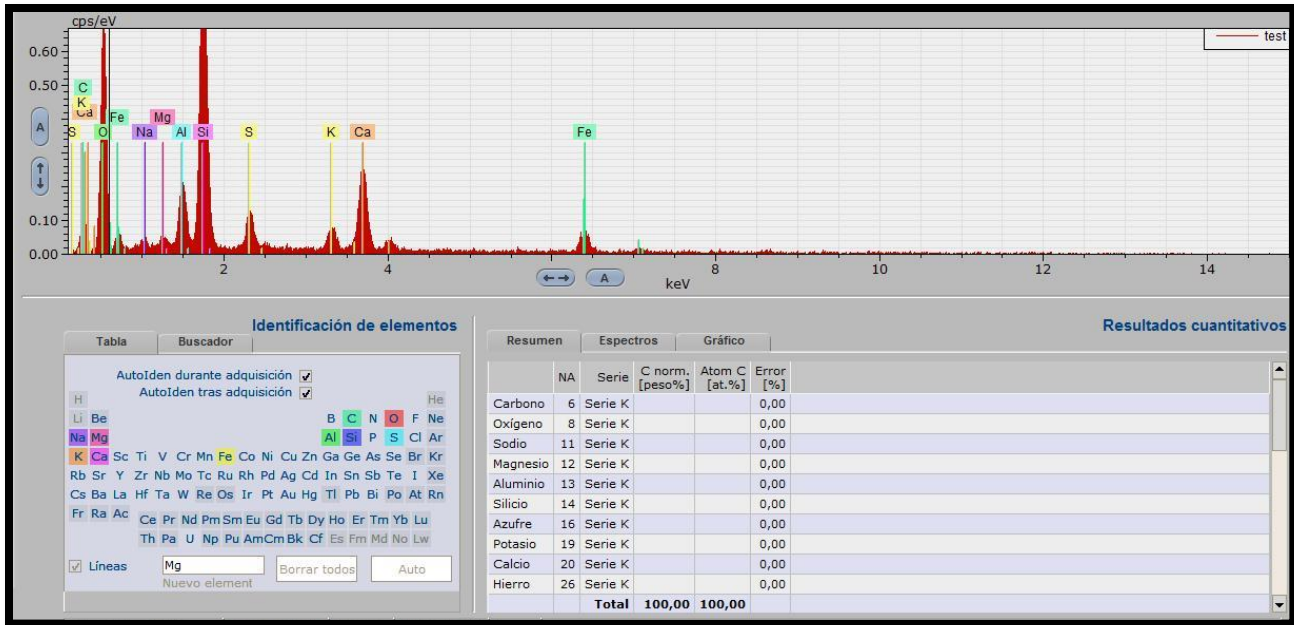


Figura 10.12. Gráfica de resultados de una partícula de la muestra JLP1.

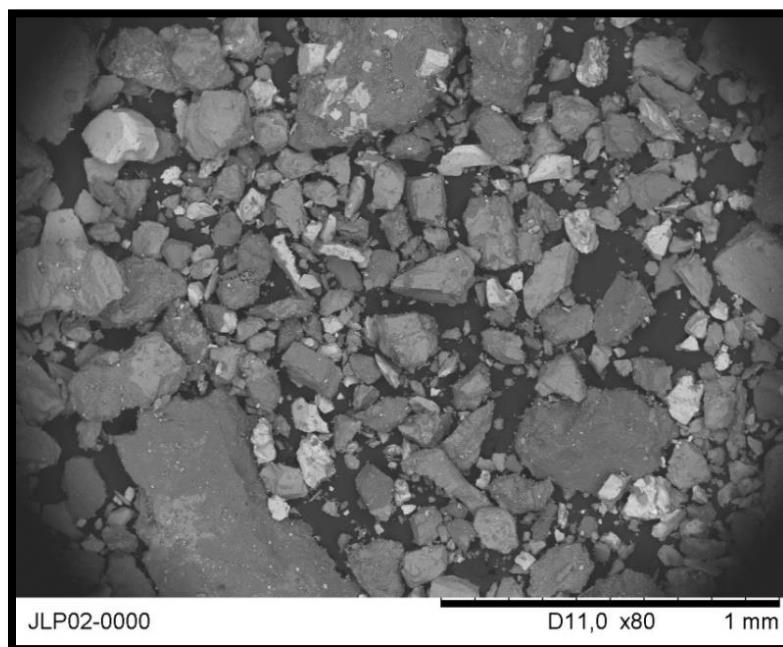


Figura 10.13. Partículas de la muestra JLP2.

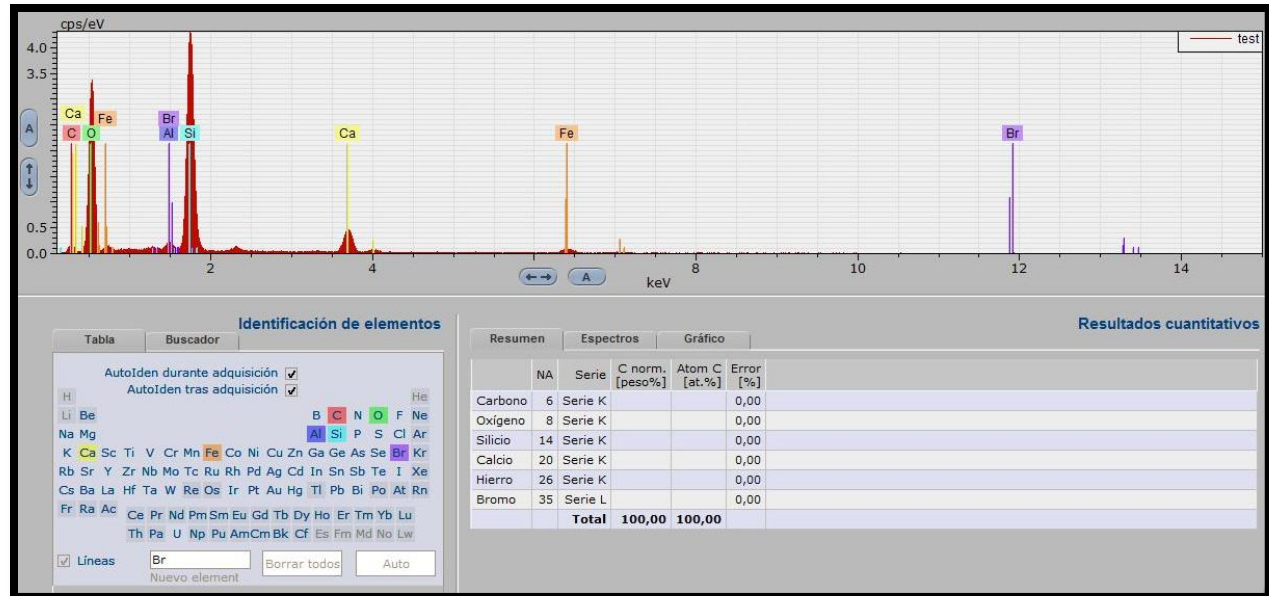


Figura 10.14. Gráfica de resultados de una partícula de la muestra JLP2.

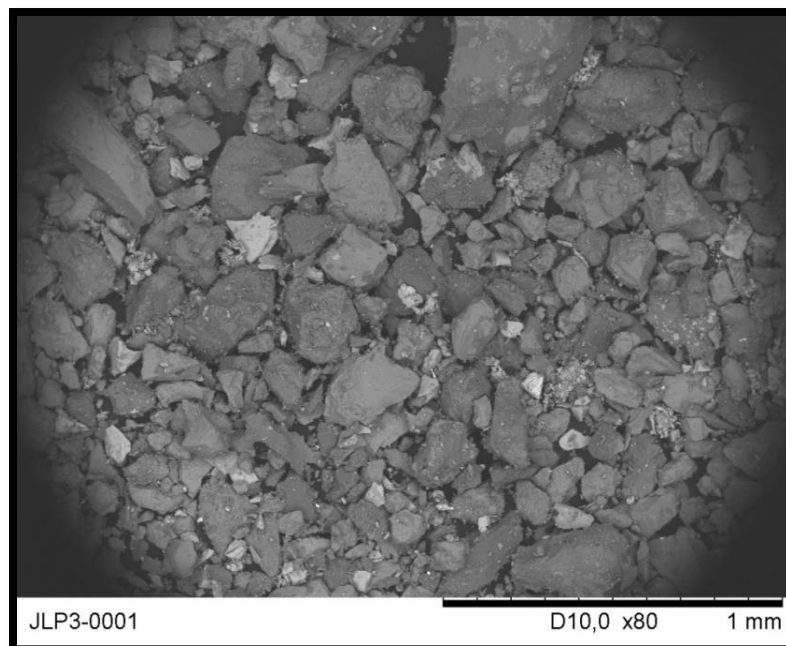


Figura 10.15. Partículas de la muestra JLP3.

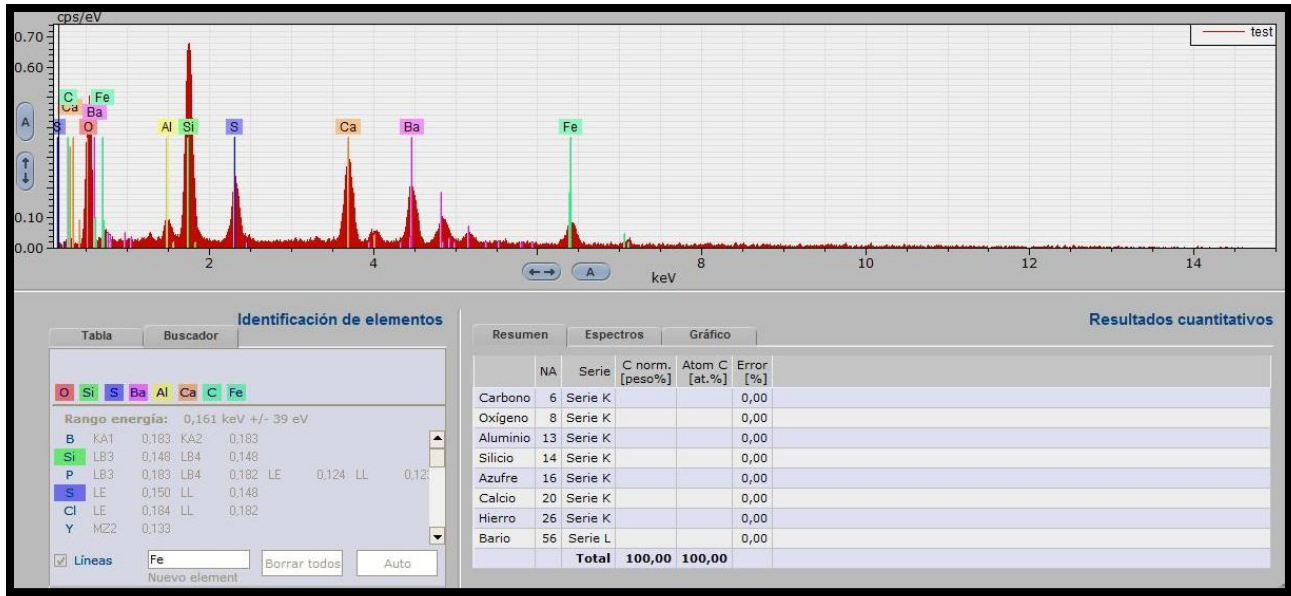


Figura 10.16. Gráfica de resultados de una partícula de la muestra JLP3.

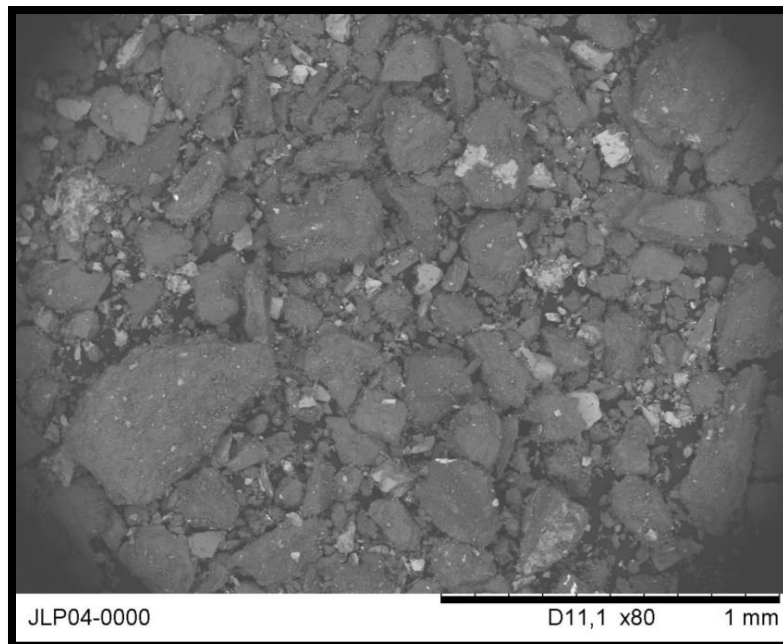


Figura 10.17. Partículas de la muestra JLP4.

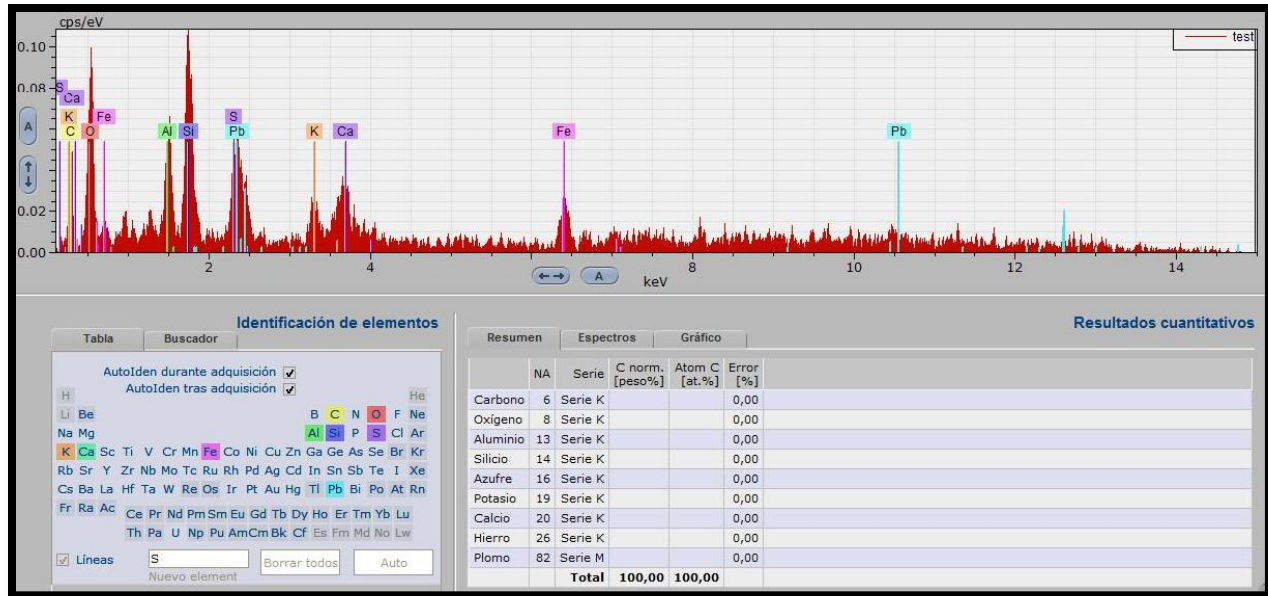


Figura 10.18. Gráfica de resultados de una partícula de la muestra JLP4.

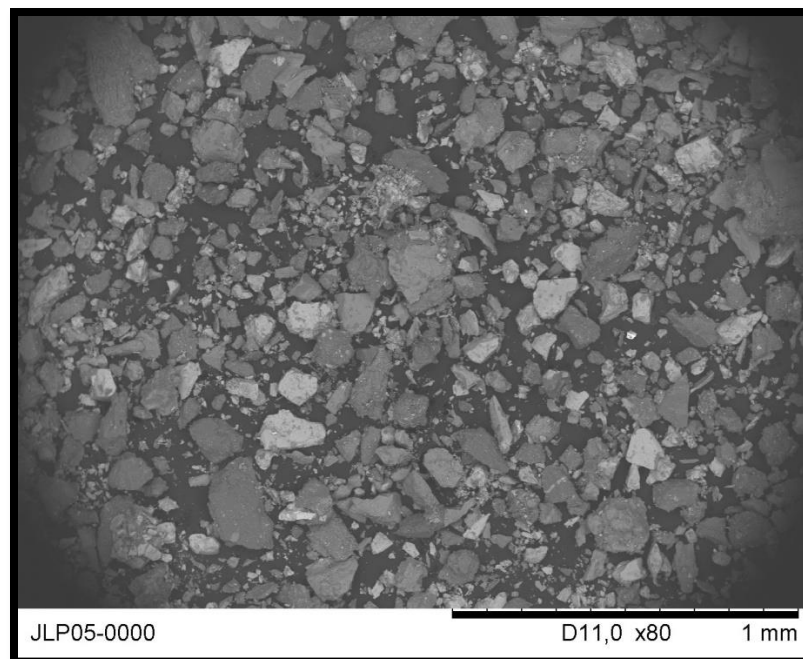


Figura 10.19. Partículas de la muestra JLP5.

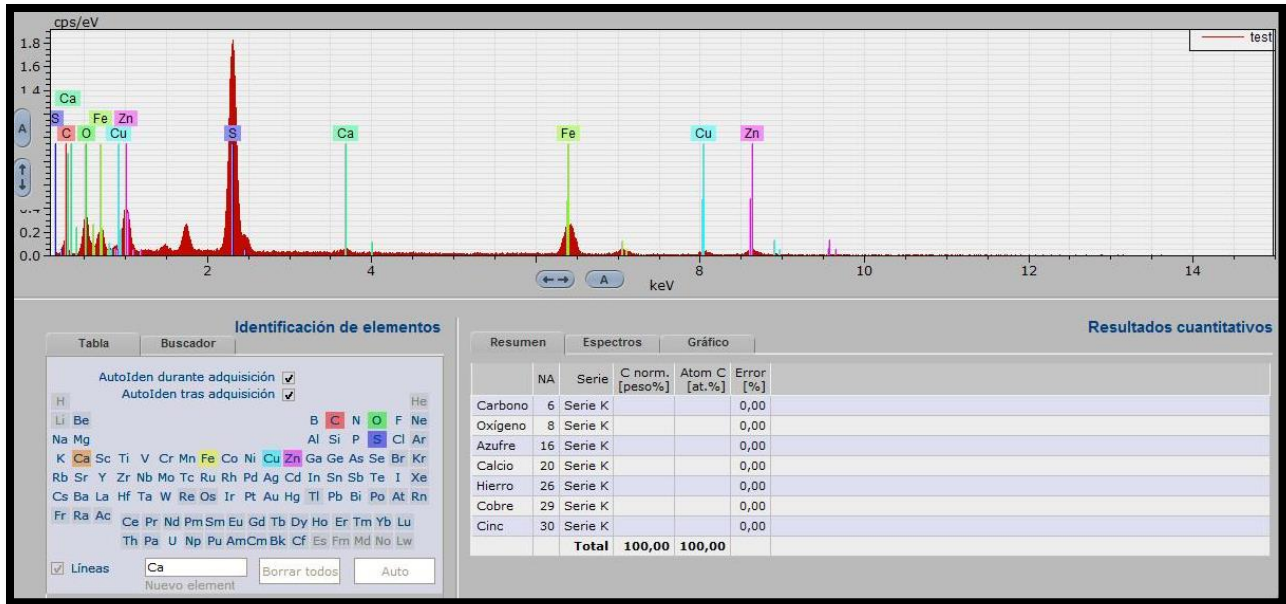


Figura 10.20. Gráfica de resultados de una partícula de la muestra JLP5.

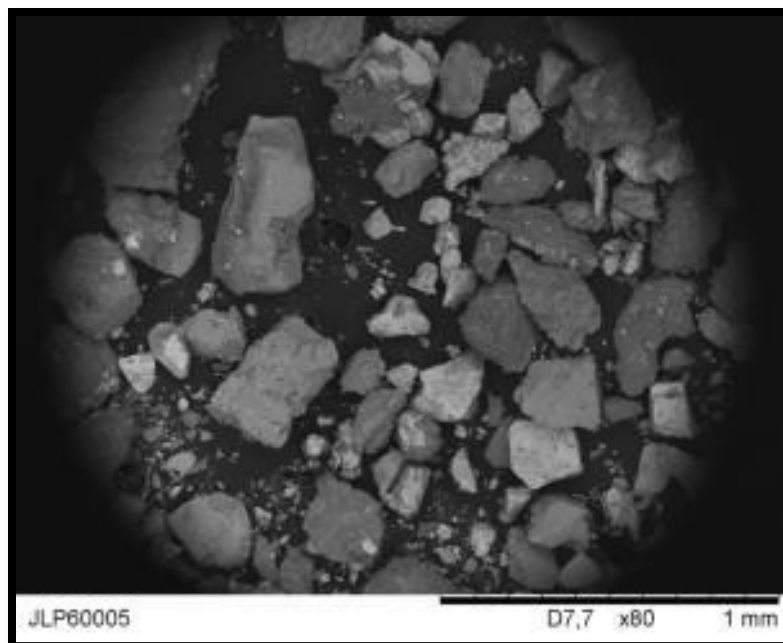


Figura 10.21. Partículas de la muestra JLP6.

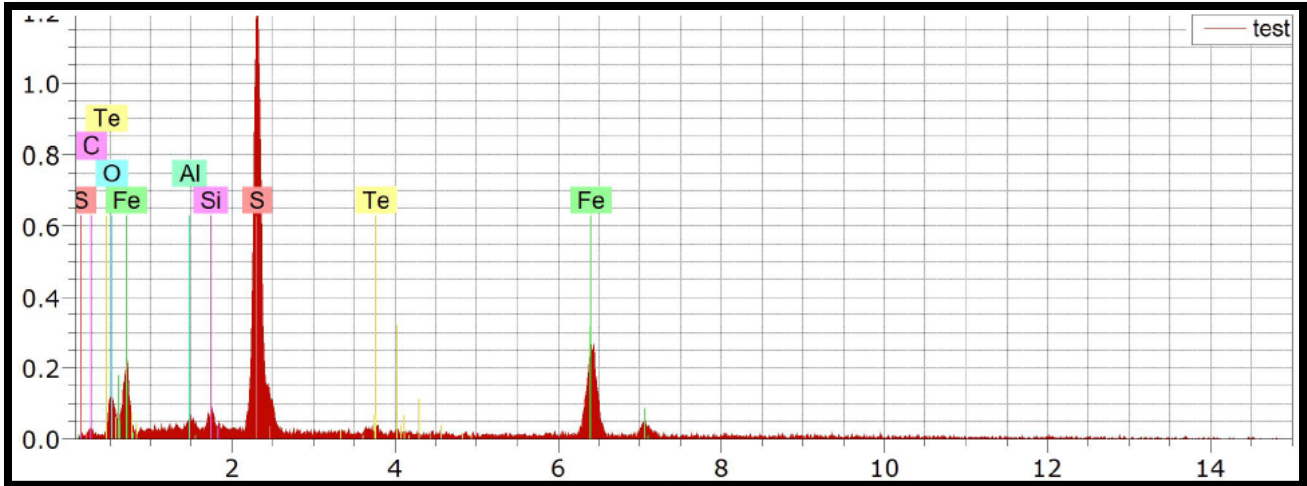


Figura 10.22. Gráfica de resultados de una partícula de la muestra JLP6.

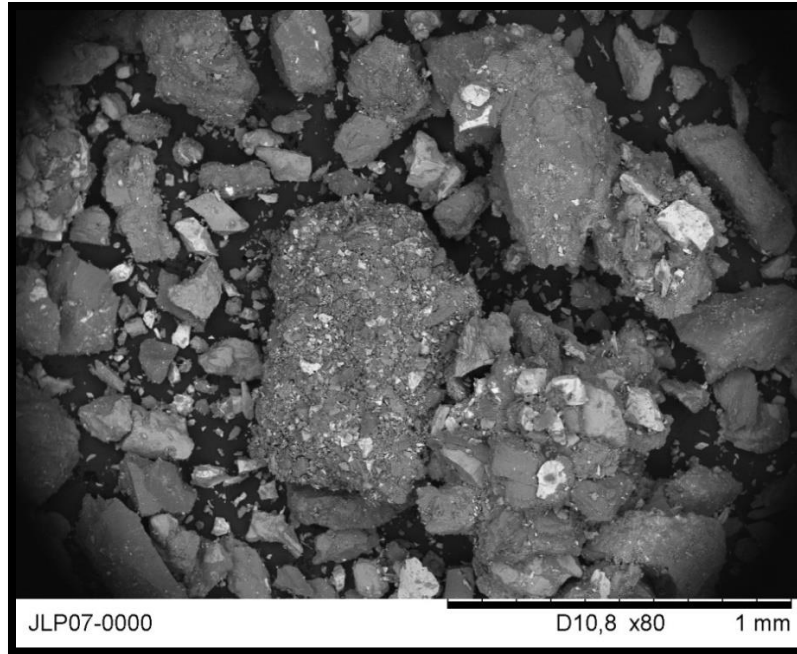


Figura 10.23. Partículas de la muestra JLP7.

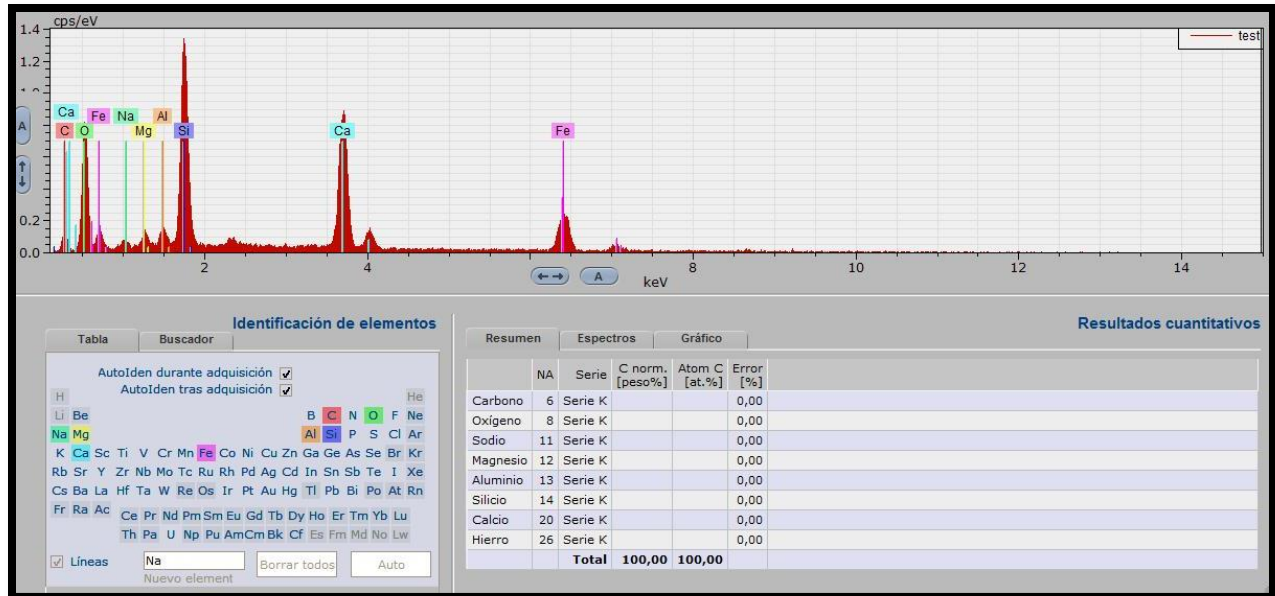


Figura 10.24. Gráfica de resultados de una partícula de la muestra JLP7.

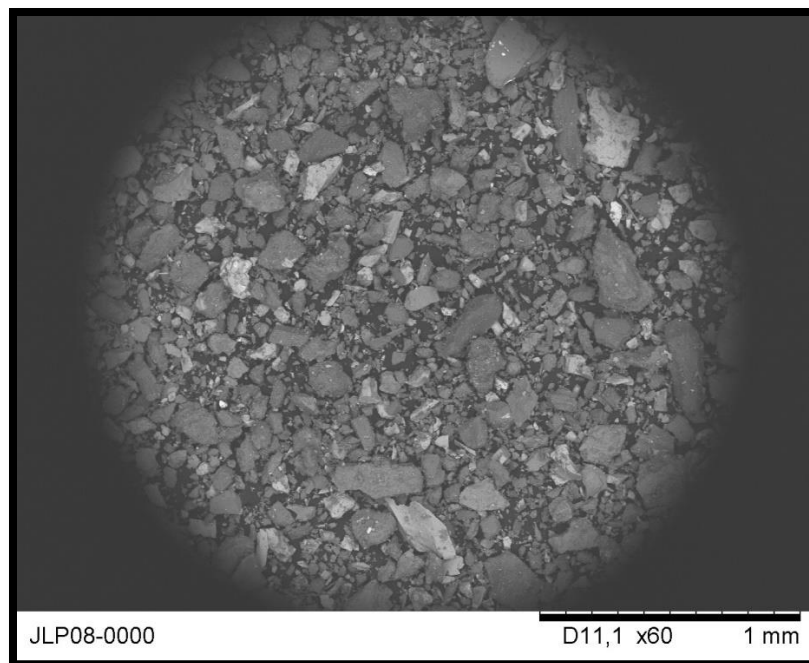


Figura 10.25. Partículas de la muestra JLP8.

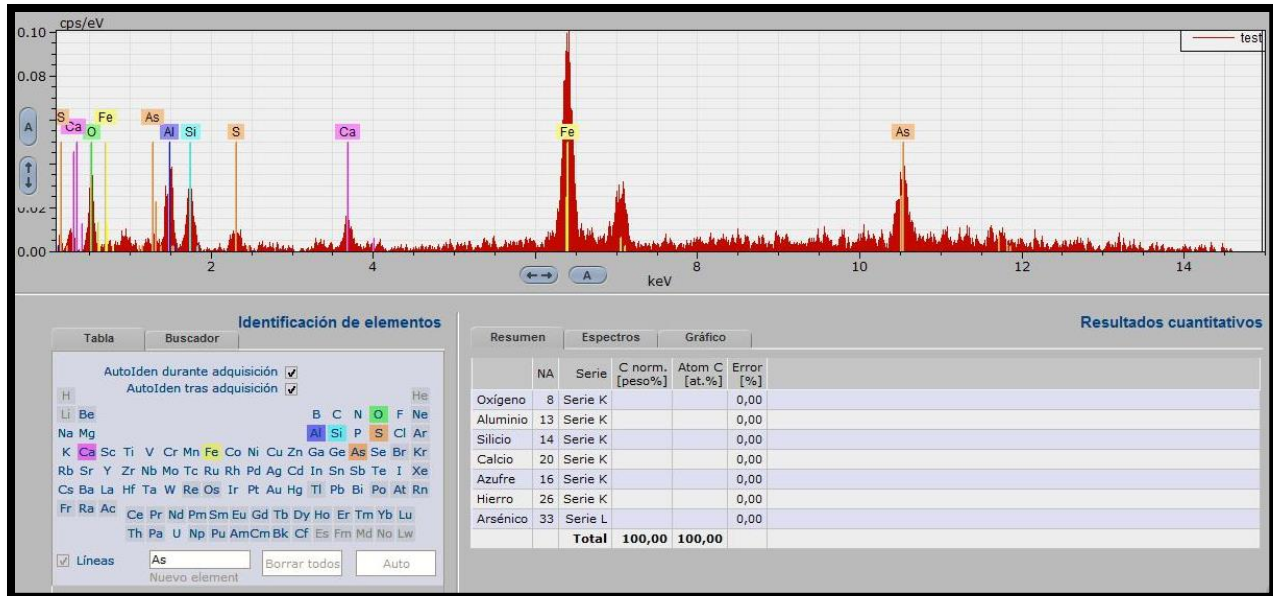


Figura 10.26. Gráfica de resultados de una partícula de la muestra JLP8.

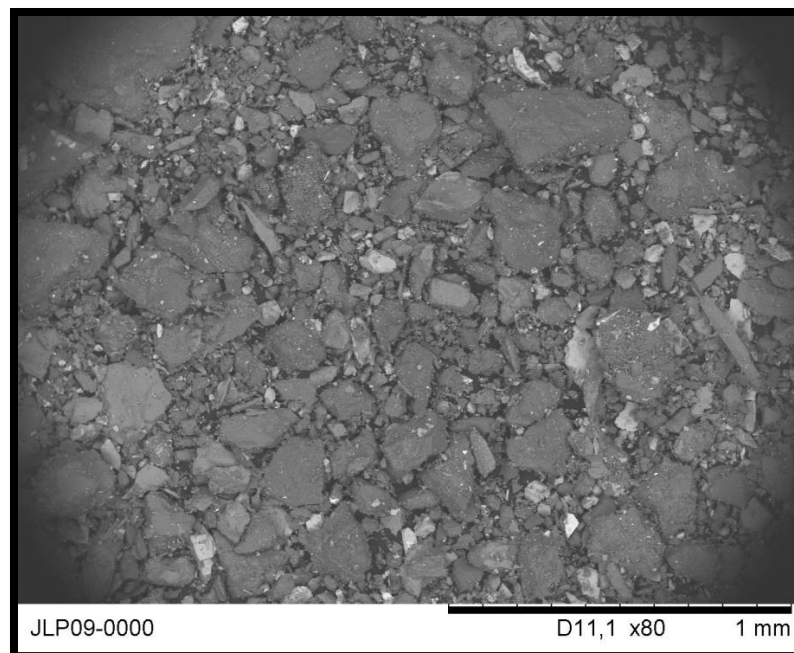


Figura 10.27. Partículas de la muestra JLP9.

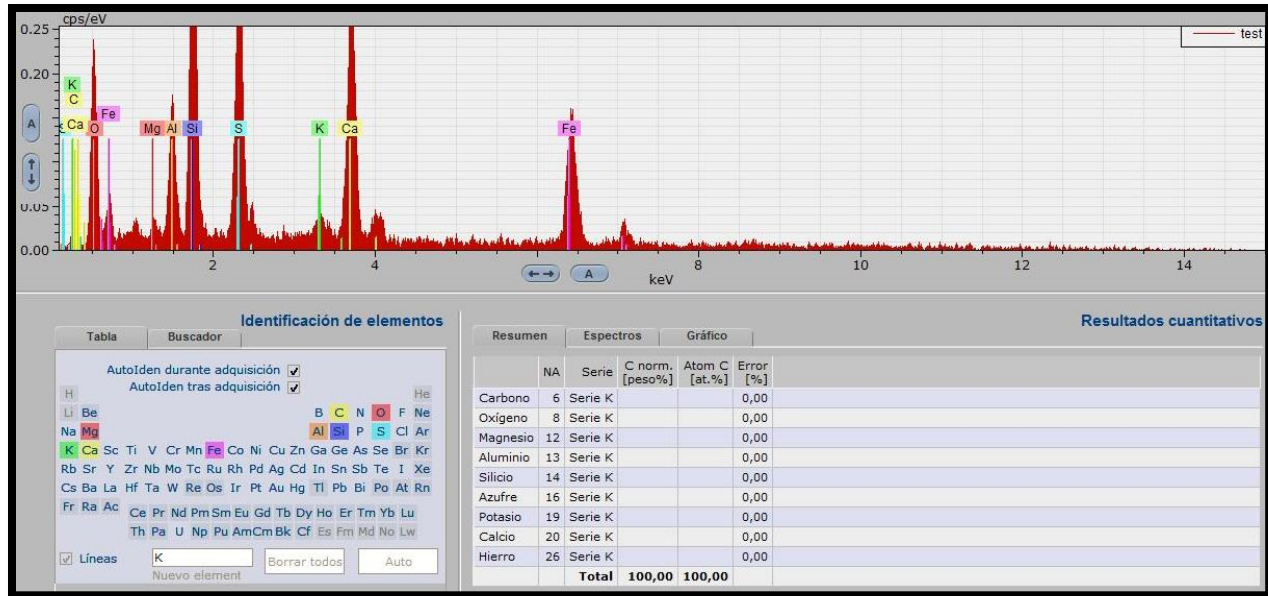


Figura 10.28. Gráfica de resultados de una partícula de la muestra JLP9.

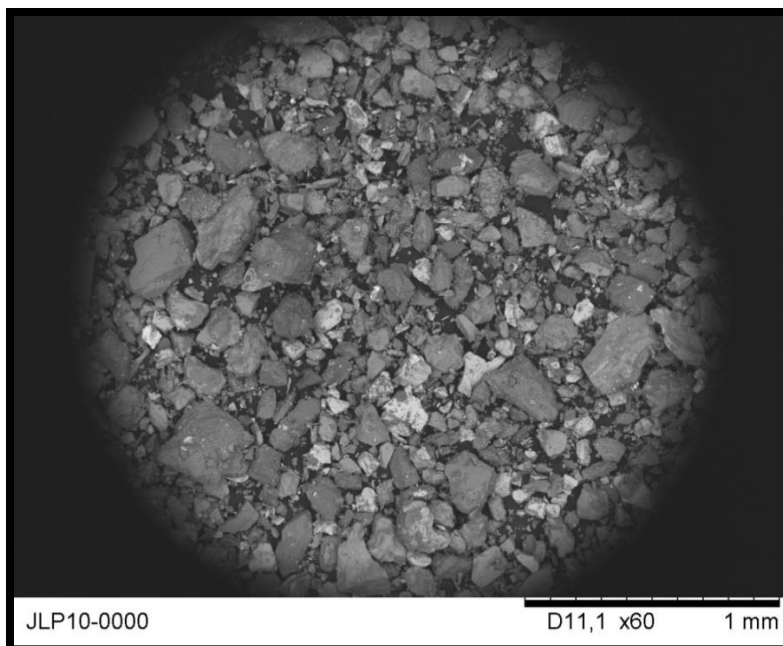


Figura 10.29. Partículas de la muestra JLP10.

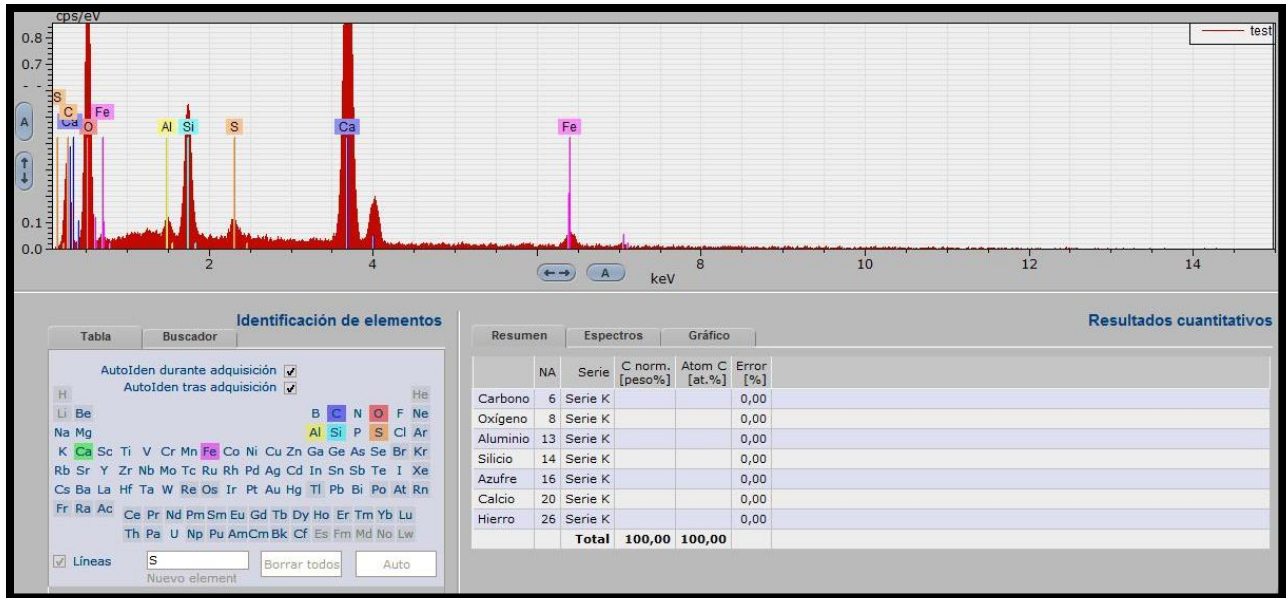


Figura 10.30. Gráfica de resultados de una partícula de la muestra JLP10.

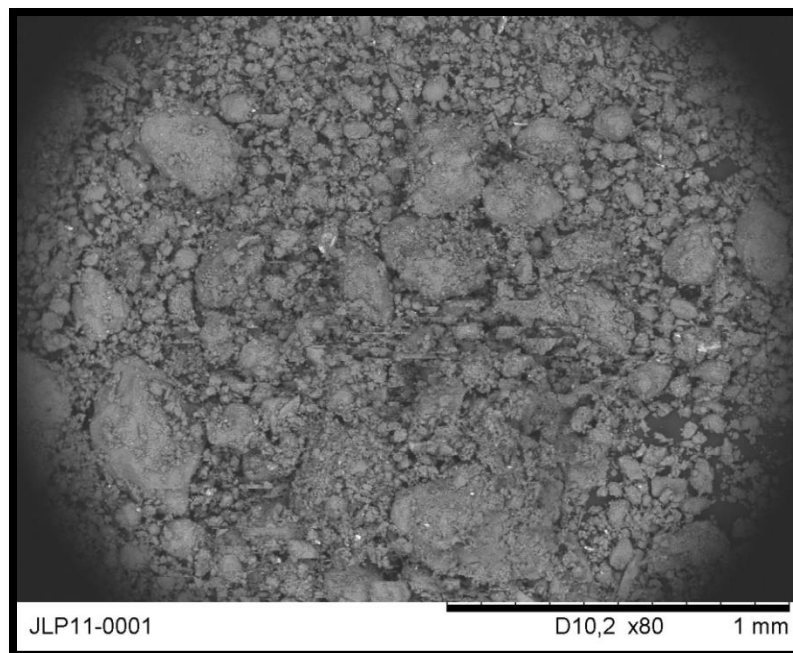


Figura 10.31. Partículas de la muestra JLP11.

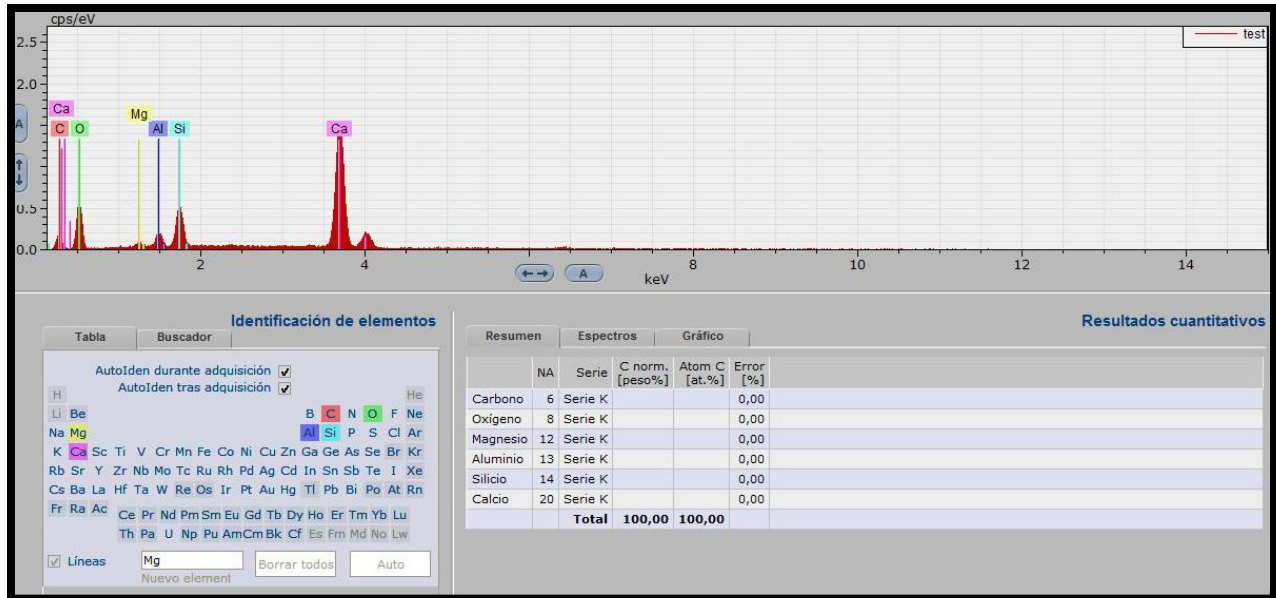


Figura 10.32. Gráfica de resultados de una partícula de la muestra JLP11.

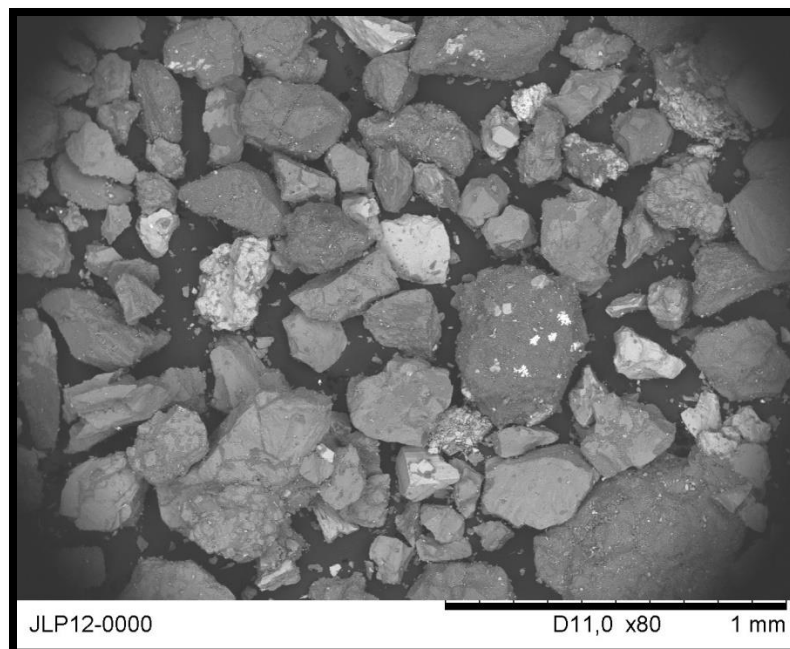


Figura 10.33. Partículas de la muestra JLP12.

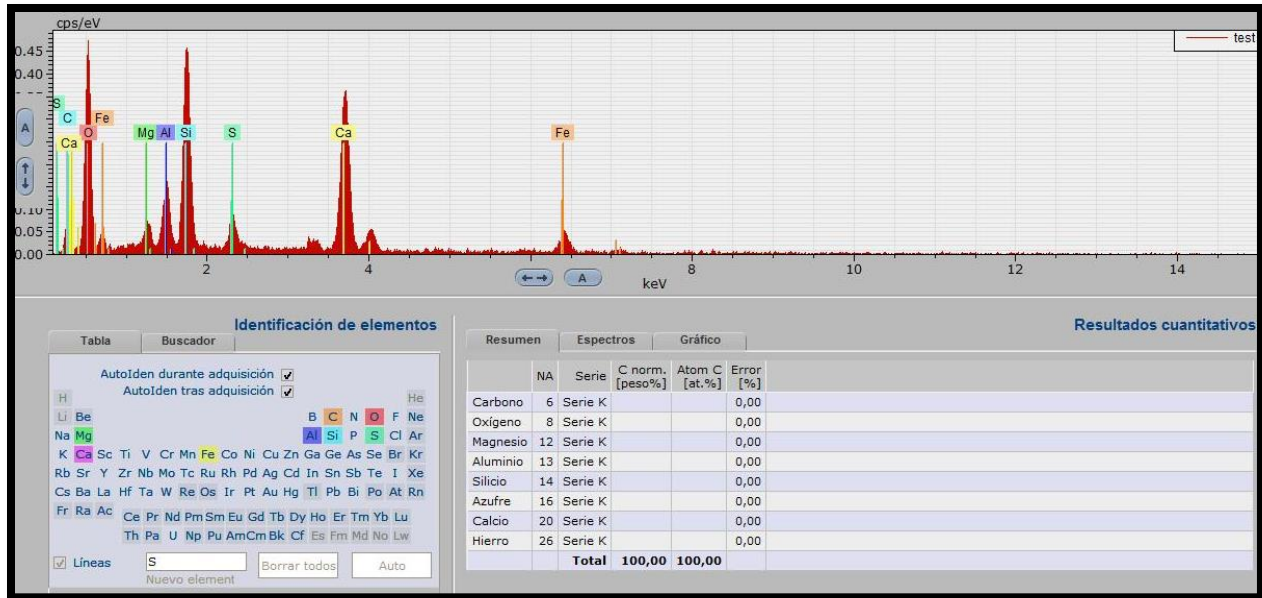


Figura 10.34. Gráfica de resultados de una partícula de la muestra JLP12.

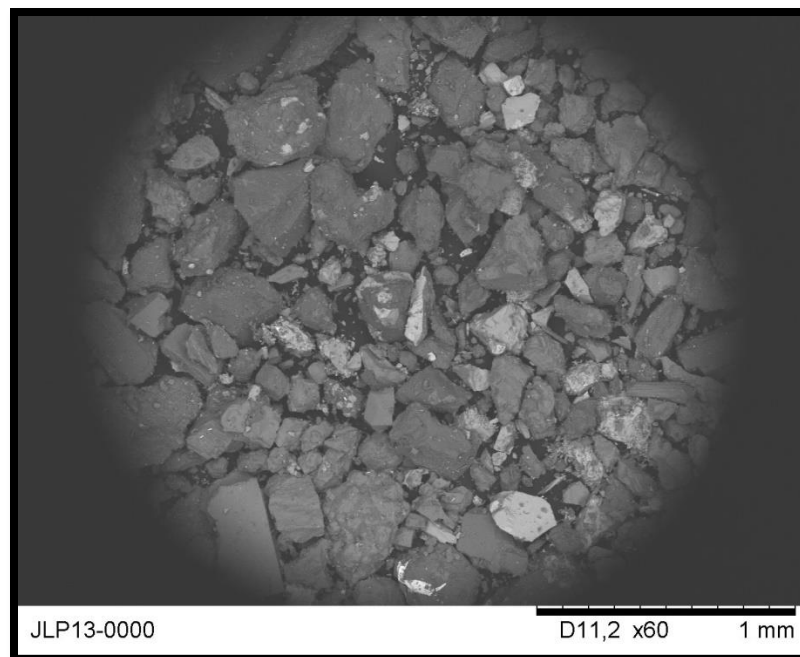


Figura 10.35. Partículas de la muestra JLP13.

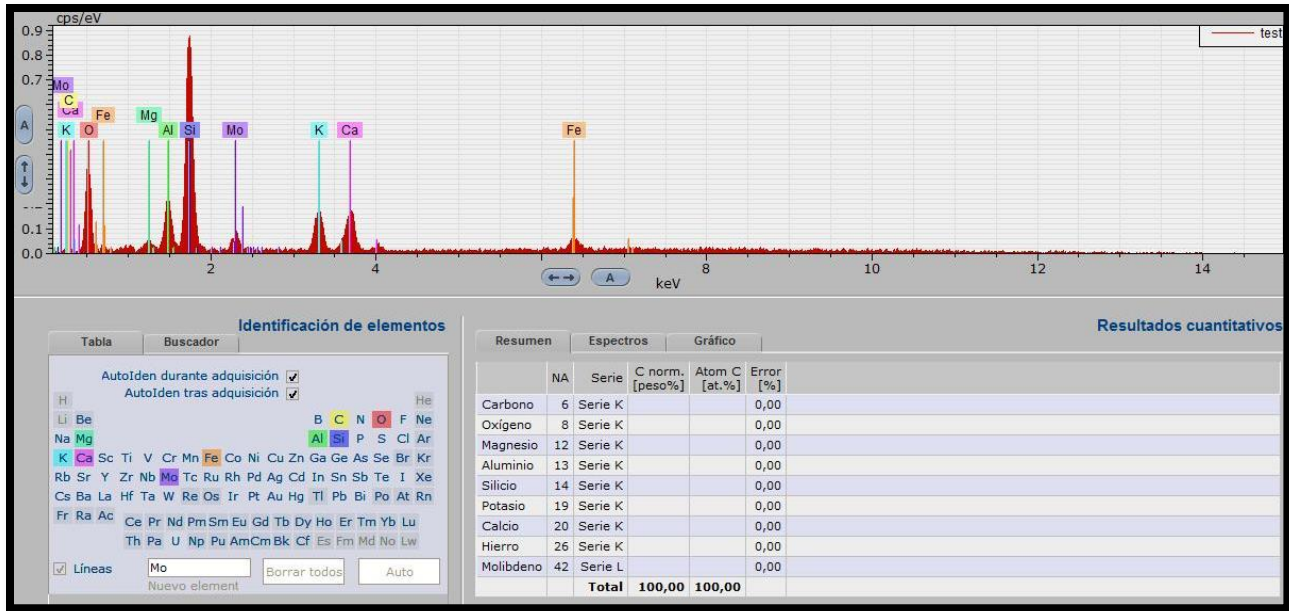


Figura 10.36. Gráfica de resultados de una partícula de la muestra JLP13.

10.6 Anexo F (Resultados de la prueba cinética)

Tabla 10.3. Resultados de pH, conductividad eléctrica, temperatura, fecha y hora de la aplicación del lavado, registro de volúmenes de entrada y salida y la alcalinidad del lixiviado de la muestra JLP1, la cual se extrajo a una profundidad de 30cm de la presa número 4

Muestra JLP1								
Tiempo	pH	CE (μS/cm)	T (°C)	Fecha	Hora	Volumen añadido (mL)	Volumen salida (mL)	Alcalinidad (mg/L)
Semana 0	8.54	524	21.7	14/07/2015	10:30	200	71	
Semana 1	7.92	688	21.5	21/07/2015	10:30	100	77	
Semana 2	7.38	550	20.6	28/07/2015	10:30	100	82	
Semana 3	8.14	713	22.8	04/08/2015	10:30	100	88	
Semana 4	8.43	436	21.1	11/08/2015	10:30	100	75	
Semana 5	7.66	583	20.3	18/08/2015	10:30	100	76	
Semana 6	7.50	484	20.1	25/08/2015	10:30	100	91	
Semana 7	7.02	527	19.9	01/09/2015	10:30	100	77	
Semana 8	6.47	406	22.8	08/09/2015	10:30	100	75	
Semana 9	8.11	232	20.9	15/09/2015	10:30	100	74	
Semana 10	7.93	394	21.5	22/09/2015	10:30	100	74	
Semana 11	7.95	310	19.1	29/09/2015	10:30	100	74	
Semana 12	7.78	266	20.5	06/10/2015	10:30	100	95	
Semana 13	8.11	243	22.0	13/10/2015	10:30	100	80	50
Semana 14	7.61	251	18.9	20/10/2015	10:30	100	92	68
Semana 15	7.96	220	19.9	27/10/2015	10:30	100	80	44
Semana 16	8.30	243	26.3	03/11/2015	10:30	100	74	90
Semana 17	8.13	266	18.9	10/11/2015	10:30	100	72	80
Semana 18	8.20	177	20.9	17/11/2015	10:30	100	90	64
Semana 19	8.18	272	19.6	24/11/2015	10:30	100	81	88
Semana 20	8.17	233	19.0	01/12/2015	10:30	100	76	76

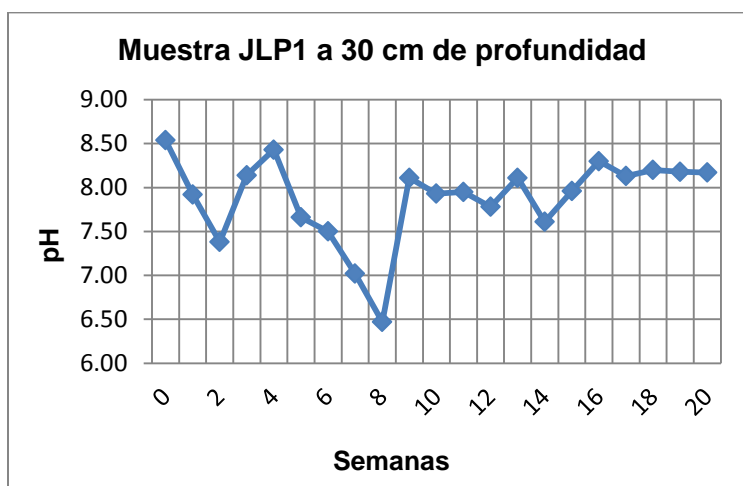


Figura 10.37. Gráfica de pH de la muestra JLP1

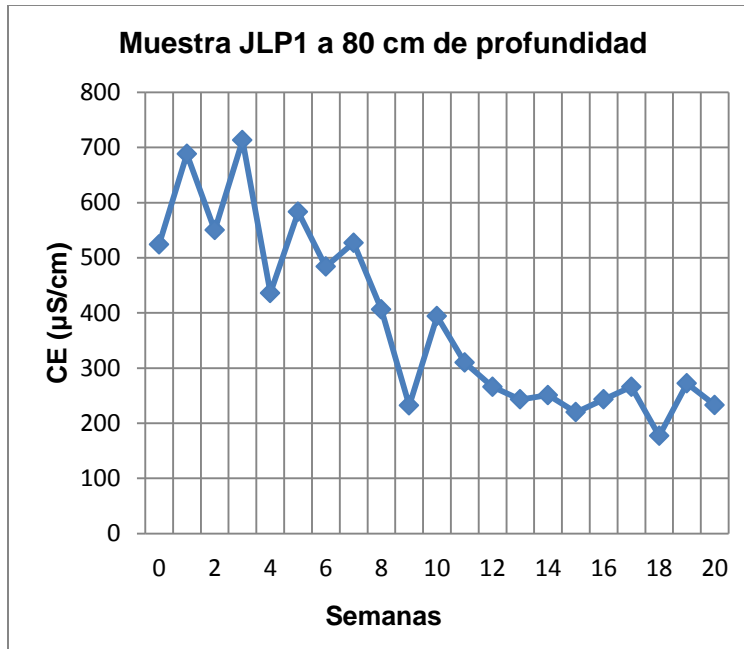


Figura 10.38. Gráfica de conductividad eléctrica de la muestra JLP1

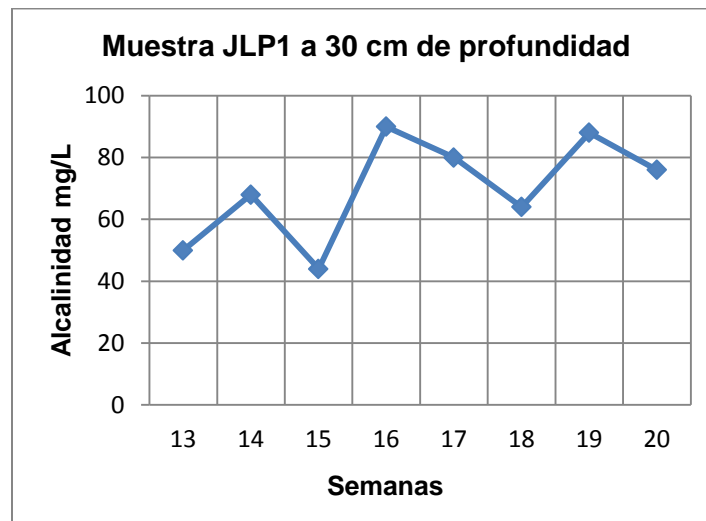


Figura 10.39. Gráfica de alcalinidad de la muestra JLP1

Tabla 10.4. Resultados de pH, conductividad eléctrica, temperatura, fecha y hora de la aplicación del lavado, registro de volúmenes de entrada y salida y la alcalinidad del lixiviado de la muestra JLP2, la cual se extrajo a una profundidad de 80cm de la presa número 4

Muestra JLP2								
Tiempo	pH	CE (µS/cm)	T (°C)	Fecha	Hora	Volumen añadido (mL)	Volumen salida (mL)	Alcalinidad (mg/L)
Semana 0	8.14	1123	21.7	14/07/2015	10:30	200	72	
Semana 1	7.87	1113	21.5	21/07/2015	10:30	100	83	
Semana 2	7.31	612	20.8	28/07/2015	10:30	100	78	
Semana 3	8.03	856	22.6	04/08/2015	10:30	100	74	
Semana 4	8.22	488	21.0	11/08/2015	10:30	100	72	
Semana 5	7.68	374	20.7	18/08/2015	10:30	100	85	
Semana 6	7.50	348	20.5	25/08/2015	10:30	100	76	
Semana 7	7.04	369	20.6	01/09/2015	10:30	100	79	
Semana 8	6.39	381	22.4	08/09/2015	10:30	100	74	
Semana 9	8.12	294	21.1	15/09/2015	10:30	100	90	
Semana 10	7.92	292	21.6	22/09/2015	10:30	100	92	
Semana 11	7.89	259	18.7	29/09/2015	10:30	100	70	
Semana 12	7.86	246	20.9	06/10/2015	10:30	100	80	
Semana 13	8.30	223	21.6	13/10/2015	10:30	100	74	104
Semana 14	7.79	361	18.8	20/10/2015	10:30	100	70	58
Semana 15	7.90	219	19.9	27/10/2015	10:30	100	73	42
Semana 16	7.97	330	23.8	03/11/2015	10:30	100	75	115
Semana 17	8.14	377	19.5	10/11/2015	10:30	100	70	108
Semana 18	7.83	289	21.3	17/11/2015	10:30	100	75	116
Semana 19	8.12	240	19.1	24/11/2015	10:30	100	75	96
Semana 20	8.07	279	18.8	01/12/2015	10:30	100	73	120

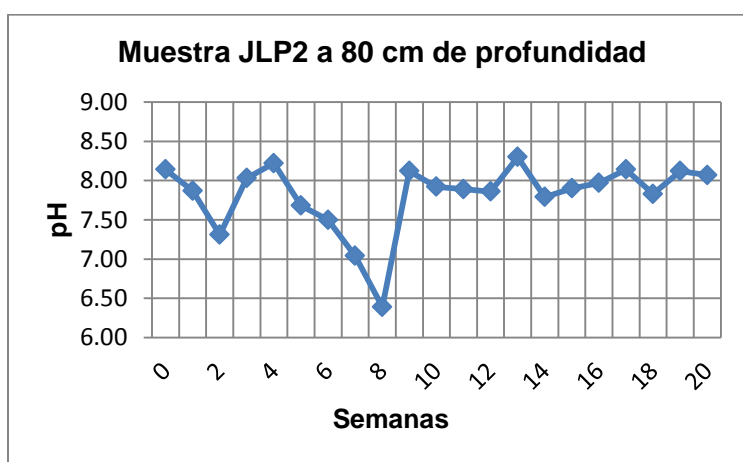


Figura 10.40. Gráfica de pH de la muestra JLP2

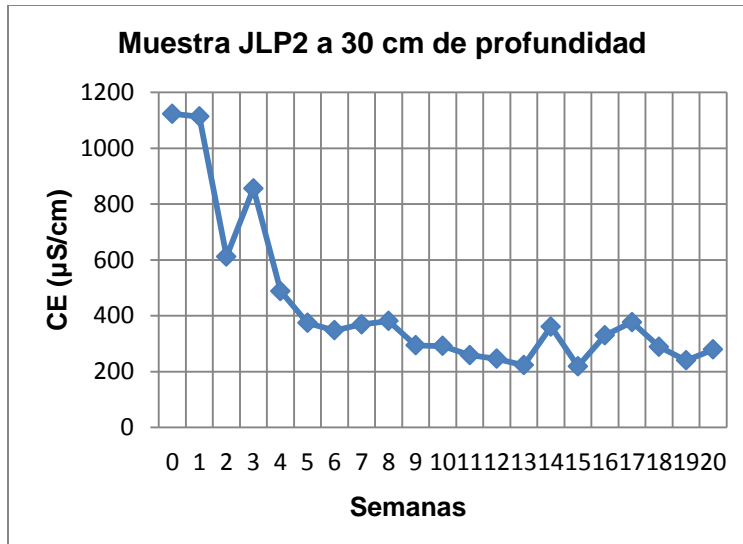


Figura 10.41. Gráfica de conductividad eléctrica de la muestra JLP2

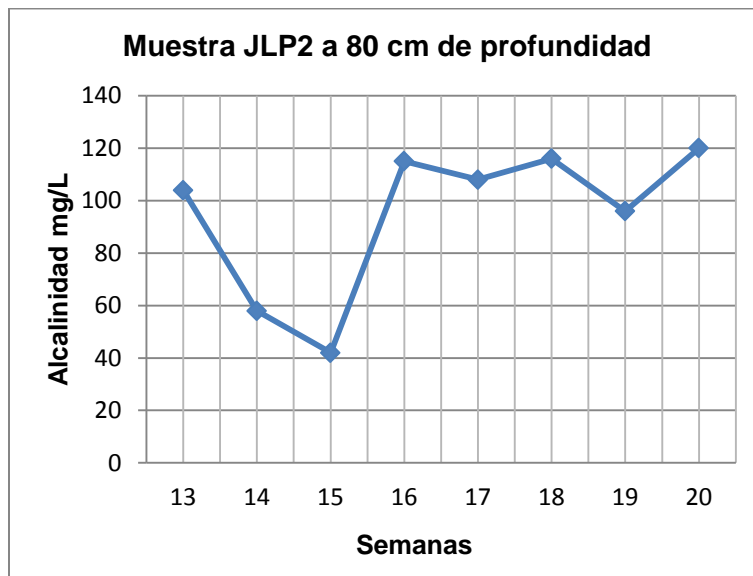


Figura 10.42. Gráfica de alcalinidad de la muestra JLP2

Tabla 10.5. Resultados de pH, conductividad eléctrica, temperatura, fecha y hora de la aplicación del lavado, registro de volúmenes de entrada y salida y la alcalinidad del lixiviado de la muestra JLP3, la cual se extrajo a una profundidad de 130cm de la presa número 4

Muestra JLP3								
Tiempo	pH	CE (μS/cm)	T (°C)	Fecha	Hora	Volumen añadido (mL)	Volumen salida (mL)	Alcalinidad (mg/L)
Semana 0	8.03	1031	21.4	14/07/2015	10:30	200	76	
Semana 1	7.98	1175	21.1	21/07/2015	10:30	100	82	
Semana 2	7.25	1425	20.4	28/07/2015	10:30	100	96	
Semana 3	7.93	688	23.2	04/08/2015	10:30	100	75	
Semana 4	8.21	558	20.8	11/08/2015	10:30	100	77	
Semana 5	7.68	422	21.0	18/08/2015	10:30	100	81	
Semana 6	7.50	395	19.7	25/08/2015	10:30	100	80	
Semana 7	7.00	399	20.5	01/09/2015	10:30	100	78	
Semana 8	6.10	324	22.3	08/09/2015	10:30	100	95	
Semana 9	8.09	335	21.1	15/09/2015	10:30	100	73	
Semana 10	7.79	301	21.6	22/09/2015	10:30	100	80	
Semana 11	7.98	260	19.6	29/09/2015	10:30	100	95	
Semana 12	7.83	250	21.4	06/10/2015	10:30	100	99	
Semana 13	8.25	256	21.8	13/10/2015	10:30	100	75	106
Semana 14	7.88	271	18.8	20/10/2015	10:30	100	80	102
Semana 15	8.09	251	20.0	27/10/2015	10:30	100	90	96
Semana 16	8.34	303	27.6	03/11/2015	10:30	100	90	130
Semana 17	8.08	286	19.4	10/11/2015	10:30	100	78	138
Semana 18	7.82	286	21.8	17/11/2015	10:30	100	98	132
Semana 19	8.07	276	19.1	24/11/2015	10:30	100	76	96
Semana 20	8.10	328	18.8	01/12/2015	10:30	100	81	136

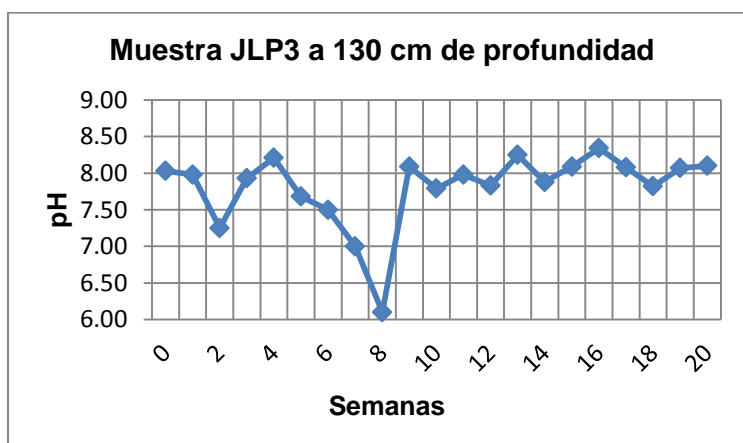


Figura 10.43. Gráfica de pH de la muestra JLP3.

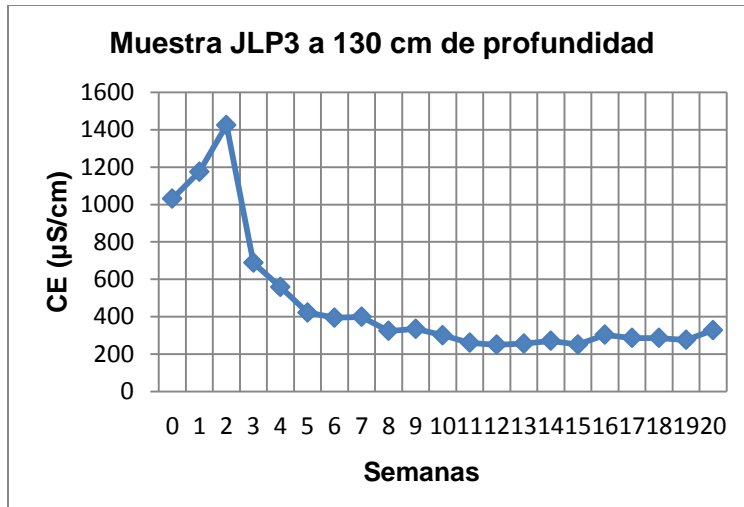


Figura 10.44. Gráfica de conductividad eléctrica de la muestra JLP3.

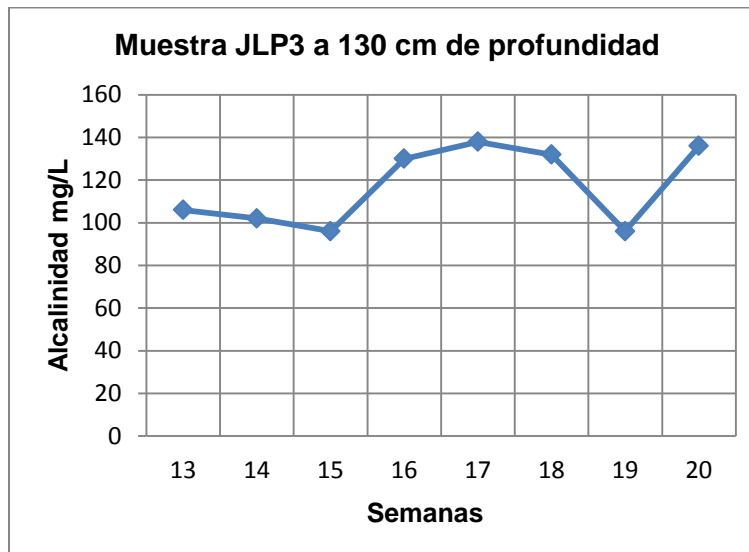


Figura 10.45. Gráfica de alcalinidad de la muestra JLP3.

Tabla 10.6. Resultados de pH, conductividad eléctrica, temperatura, fecha y hora de la aplicación del lavado, registro de volúmenes de entrada y salida y la alcalinidad del lixiviado de la muestra JLP4, la cual se extrajo a una profundidad de 180cm de la presa número 4

Muestra JLP4								
Tiempo	pH	CE (μS/cm)	T (°C)	Fecha	Hora	Volumen añadido (mL)	Volumen salida (mL)	Alcalinidad (mg/L)
Semana 0	8.06	1727	21.5	14/07/2015	10:30	200	77	
Semana 1	7.89	1587	21.3	21/07/2015	10:30	100	80	
Semana 2	7.25	1425	20.4	28/07/2015	10:30	100	74	
Semana 3	8.06	565	22.5	04/08/2015	10:30	100	95	
Semana 4	8.25	398	20.7	11/08/2015	10:30	100	88	
Semana 5	7.71	370	20.8	18/08/2015	10:30	100	74	
Semana 6	7.51	381	20.0	25/08/2015	10:30	100	76	
Semana 7	7.20	429	20.2	01/09/2015	10:30	100	81	
Semana 8	6.33	390	22.2	08/09/2015	10:30	100	75	
Semana 9	8.03	338	20.9	15/09/2015	10:30	100	78	
Semana 10	7.78	334	21.5	22/09/2015	10:30	100	98	
Semana 11	7.87	299	19.2	29/09/2015	10:30	100	75	
Semana 12	7.76	284	20.7	06/10/2015	10:30	100	97	
Semana 13	8.09	285	21.8	13/10/2015	10:30	100	80	110
Semana 14	7.83	295	18.3	20/10/2015	10:30	100	73	106
Semana 15	8.05	268	20.2	27/10/2015	10:30	100	95	106
Semana 16	8.25	317	23.3	03/11/2015	10:30	100	97	135
Semana 17	8.01	303	19.5	10/11/2015	10:30	100	80	146
Semana 18	7.81	300	21.2	17/11/2015	10:30	100	73	134
Semana 19	8.00	274	18.9	24/11/2015	10:30	100	79	112
Semana 20	7.98	315	19.0	01/12/2015	10:30	100	89	144

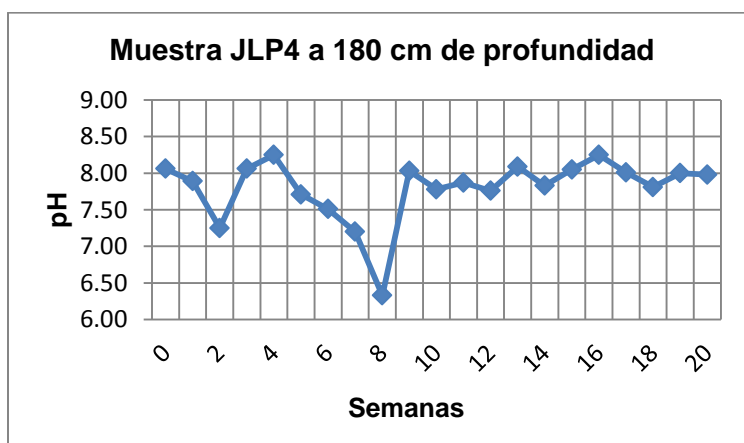


Figura 10.46. Gráfica de pH de la muestra JLP4.

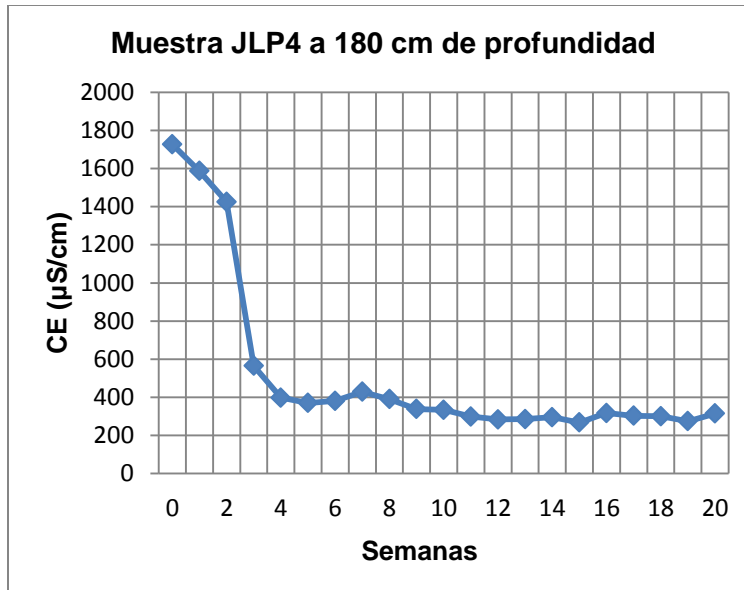


Figura 10.47. Gráfica de conductividad eléctrica de la muestra JLP4.

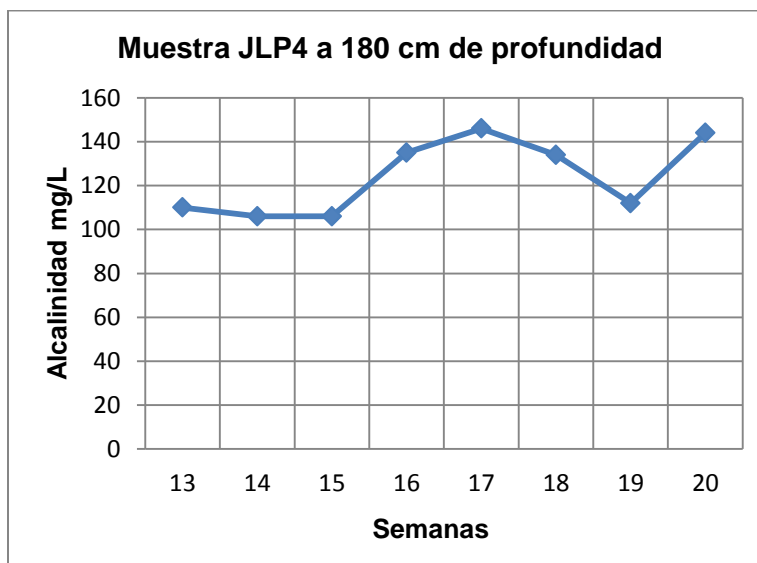


Figura 10.48. Gráfica de alcalinidad de la muestra JLP4.

Tabla 10.7. Resultados de pH, conductividad eléctrica, temperatura, fecha y hora de la aplicación del lavado, registro de volúmenes de entrada y salida y la alcalinidad del lixiviado de la muestra JLP5, la cual se extrajo a una profundidad de 390cm de la presa número 4

Muestra JLP5								
Tiempo	pH	CE (μS/cm)	T (°C)	Fecha	Hora	Volumen añadido (mL)	Volumen salida (mL)	Alcalinidad (mg/L)
Semana 0	7.08	3973	21.8	14/07/2015	10:30	200	81	
Semana 1	7.63	2232	21.3	21/07/2015	10:30	100	96	
Semana 2	6.97	2038	20.8	28/07/2015	10:30	100	92	
Semana 3	7.74	1856	23.1	04/08/2015	10:30	100	93	
Semana 4	7.92	1773	20.6	11/08/2015	10:30	100	95	
Semana 5	7.59	1661	20.4	18/08/2015	10:30	100	97	
Semana 6	7.52	1681	19.7	25/08/2015	10:30	100	98	
Semana 7	7.11	1646	19.5	01/09/2015	10:30	100	96	
Semana 8	6.26	1519	21.8	08/09/2015	10:30	100	95	
Semana 9	8.05	1474	20.4	15/09/2015	10:30	100	97	
Semana 10	7.75	1415	21.5	22/09/2015	10:30	100	97	
Semana 11	7.90	1292	18.8	29/09/2015	10:30	100	97	
Semana 12	7.86	1150	20.7	06/10/2015	10:30	100	99	
Semana 13	8.14	1022	21.8	13/10/2015	10:30	100	97	88
Semana 14	8.03	827	18.2	20/10/2015	10:30	100	98	94
Semana 15	8.27	773	19.8	27/10/2015	10:30	100	98	98
Semana 16	8.44	747	25.5	03/11/2015	10:30	100	98	140
Semana 17	8.18	188	18.8	10/11/2015	10:30	100	92	100
Semana 18	8.10	253	21.1	17/11/2015	10:30	100	90	102
Semana 19	8.04	1278	19.4	24/11/2015	10:30	100	96	104
Semana 20	8.06	848	18.9	01/12/2015	10:30	100	95	140

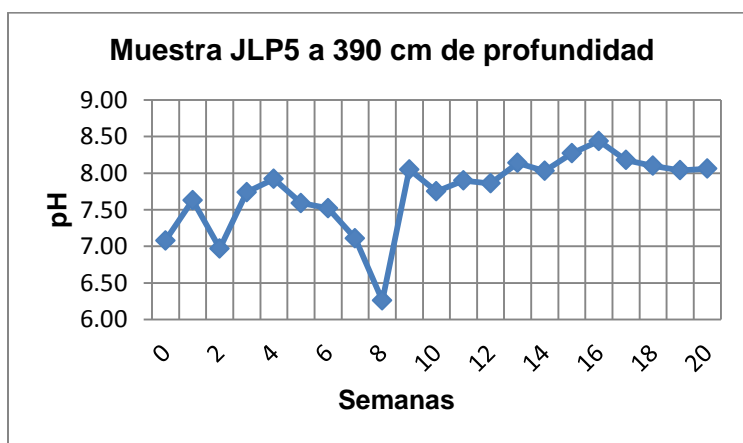


Figura 10.49. Gráfica de pH de la muestra JLP5.

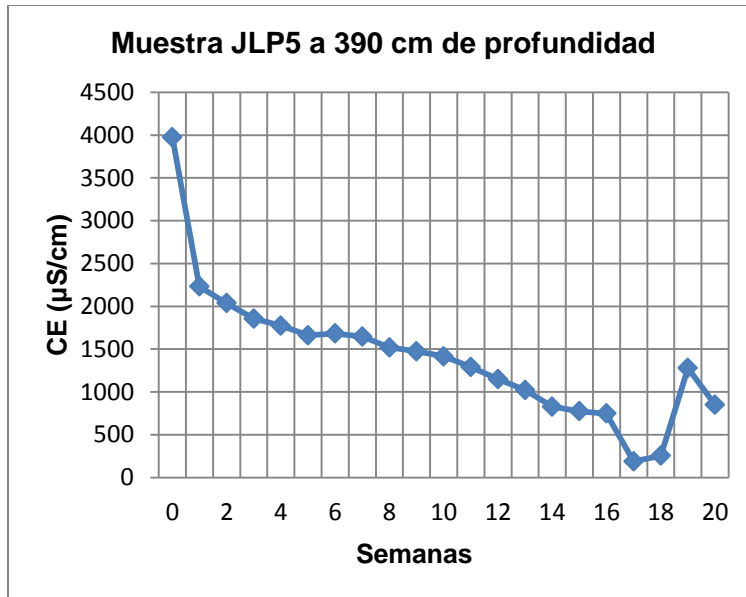


Figura 10.50. Gráfica de conductividad eléctrica de la muestra JLP5.

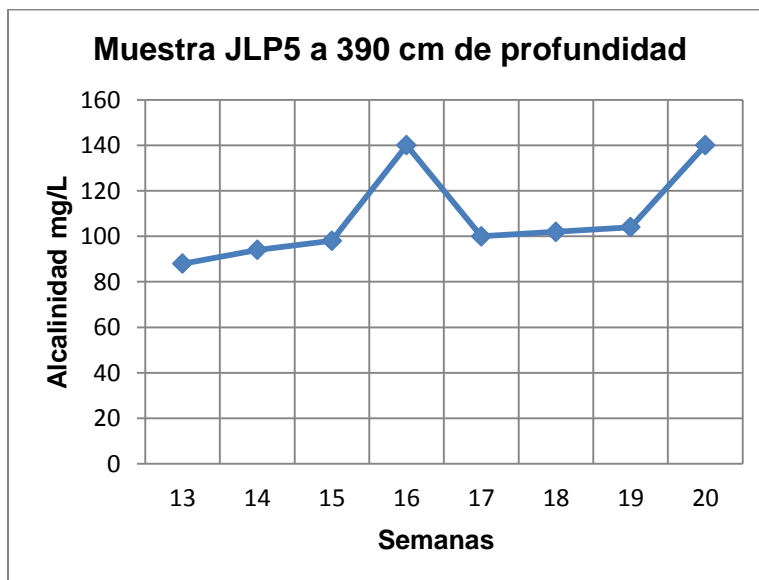


Figura 10.51. Gráfica de alcalinidad de la muestra JLP5.

Tabla 10.8. Resultados de pH, conductividad eléctrica, temperatura, fecha y hora de la aplicación del lavado, registro de volúmenes de entrada y salida y la alcalinidad del lixiviado de la muestra JLP6, la cual se extrajo a una profundidad de 300cm de la presa número 4

Muestra JLP6								
Tiempo	pH	CE (μS/cm)	T (°C)	Fecha	Hora	Volumen añadido (mL)	Volumen salida (mL)	Alcalinidad (mg/L)
Semana 0	8.01	1502	21.6	14/07/2015	10:30	200	78	
Semana 1	7.67	1662	21.1	21/07/2015	10:30	100	81	
Semana 2	7.23	1570	20.4	28/07/2015	10:30	100	91	
Semana 3	7.85	1435	22.5	04/08/2015	10:30	100	85	
Semana 4	7.99	1423	20.7	11/08/2015	10:30	100	75	
Semana 5	7.51	1413	21.2	18/08/2015	10:30	100	82	
Semana 6	7.34	1325	20.1	25/08/2015	10:30	100	96	
Semana 7	7.00	1320	20.2	01/09/2015	10:30	100	93	
Semana 8	6.29	1320	21.7	08/09/2015	10:30	100	80	
Semana 9	7.90	1345	20.5	15/09/2015	10:30	100	85	
Semana 10	7.66	1364	21.4	22/09/2015	10:30	100	98	
Semana 11	7.95	1429	18.7	29/09/2015	10:30	100	74	
Semana 12	7.80	1344	20.7	06/10/2015	10:30	100	98	
Semana 13	8.05	1317	21.9	13/10/2015	10:30	100	97	70
Semana 14	7.90	1467	18.6	20/10/2015	10:30	100	97	68
Semana 15	8.07	1479	19.9	27/10/2015	10:30	100	97	62
Semana 16	8.31	1528	24.6	03/11/2015	10:30	100	97	105
Semana 17	7.95	1479	19.4	10/11/2015	10:30	100	96	92
Semana 18	8.03	1430	21.1	17/11/2015	10:30	100	97	98
Semana 19	8.06	1440	19.1	24/11/2015	10:30	100	98	72
Semana 20	8.03	1416	18.9	01/12/2015	10:30	100	96	112

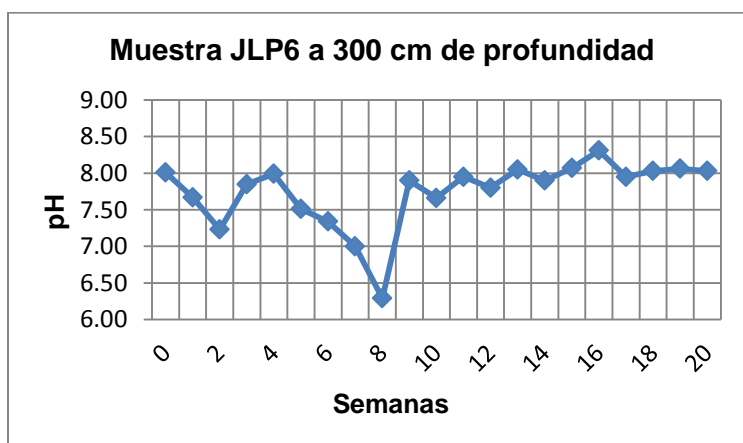


Figura 10.52. Gráfica de pH de la muestra JLP6.

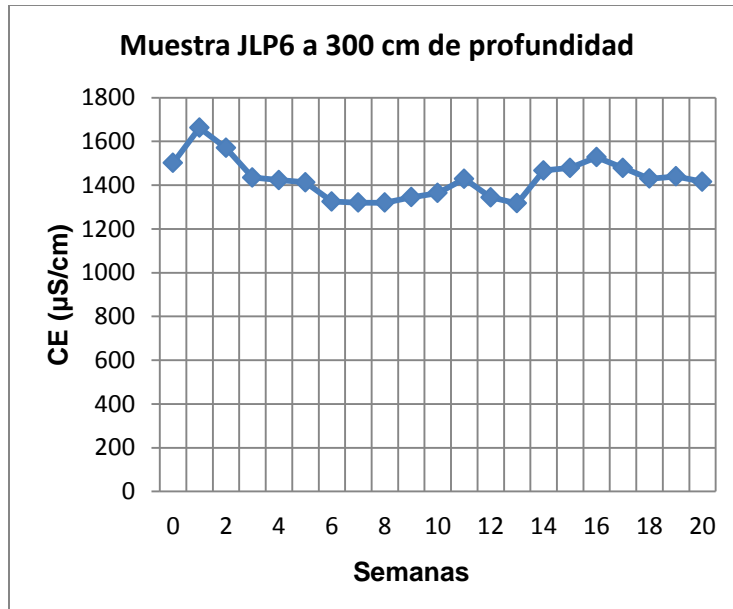


Figura 10.53. Gráfica de conductividad eléctrica de la muestra JLP6.

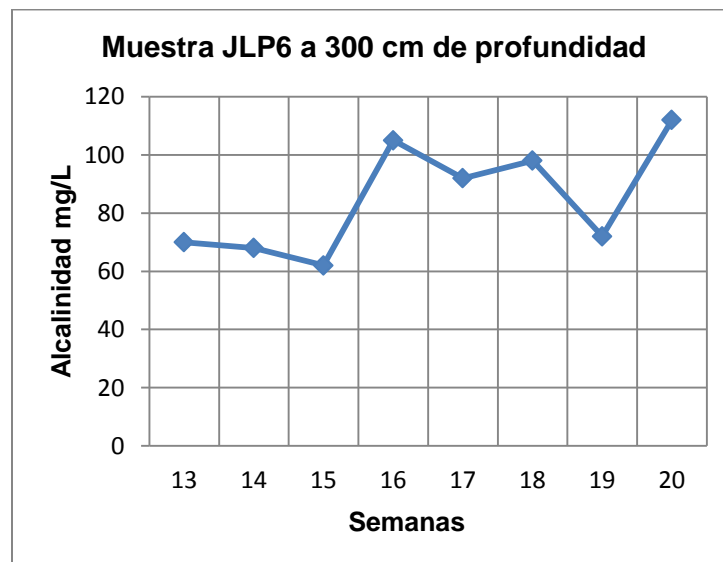


Figura 10.54. Gráfica de alcalinidad de la muestra JLP6.

Tabla 10.9. Resultados de pH, conductividad eléctrica, temperatura, fecha y hora de la aplicación del lavado, registro de volúmenes de entrada y salida y la alcalinidad del lixiviado de la muestra JLP7, la cual se extrajo a una profundidad de 110cm de la presa número 2

Muestra JLP7								
Tiempo	pH	CE (μS/cm)	T (°C)	Fecha	Hora	Volumen añadido (mL)	Volumen salida (mL)	Alcalinidad (mg/L)
Semana 0	7.92	1421	21.5	14/07/2015	10:30	200	76	
Semana 1	8.05	1601	21.1	21/07/2015	10:30	100	82	
Semana 2	7.17	1533	20.4	28/07/2015	10:30	100	79	
Semana 3	7.67	1484	22.8	04/08/2015	10:30	100	95	
Semana 4	7.69	1446	20.6	11/08/2015	10:30	100	89	
Semana 5	7.49	1522	21.5	18/08/2015	10:30	100	84	
Semana 6	7.36	1552	20.9	25/08/2015	10:30	100	77	
Semana 7	6.92	1552	20.4	01/09/2015	10:30	100	79	
Semana 8	6.60	1585	22.2	08/09/2015	10:30	100	74	
Semana 9	7.65	1550	21.0	15/09/2015	10:30	100	84	
Semana 10	7.48	1541	22.2	22/09/2015	10:30	100	80	
Semana 11	7.58	1520	19.3	29/09/2015	10:30	100	90	
Semana 12	7.50	1427	22.1	06/10/2015	10:30	100	98	
Semana 13	7.77	1528	22.4	13/10/2015	10:30	100	74	44
Semana 14	7.57	1580	18.8	20/10/2015	10:30	100	75	60
Semana 15	7.79	1581	20.0	27/10/2015	10:30	100	77	82
Semana 16	7.92	1652	26.3	03/11/2015	10:30	100	80	130
Semana 17	7.62	1564	19.7	10/11/2015	10:30	100	80	114
Semana 18	7.86	1597	21.6	17/11/2015	10:30	100	74	118
Semana 19	7.81	1583	19.4	24/11/2015	10:30	100	76	92
Semana 20	7.74	1560	19.2	01/12/2015	10:30	100	77	128

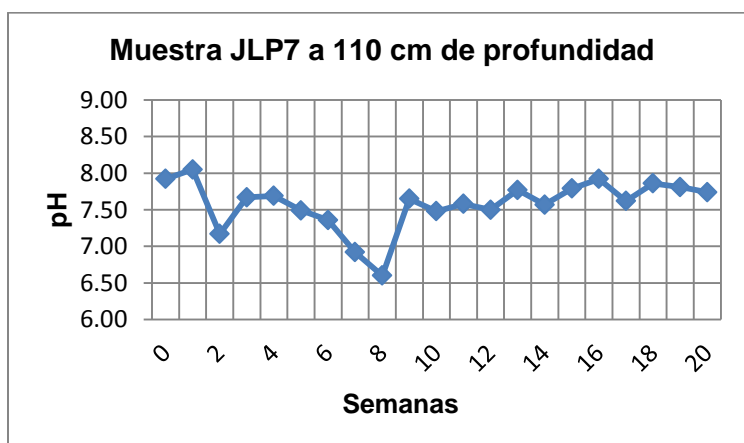


Figura 10.55. Gráfica de pH de la muestra JLP7.

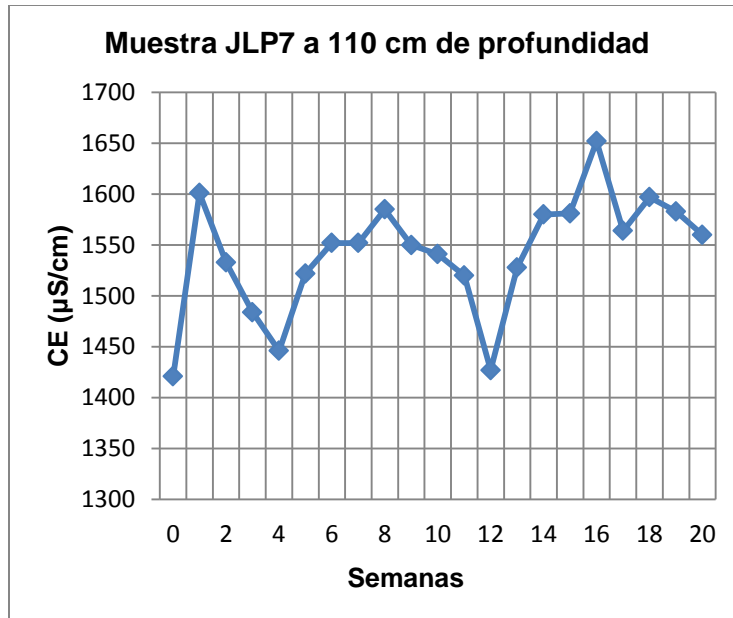


Figura 10.56. Gráfica de conductividad eléctrica de la muestra JLP7.

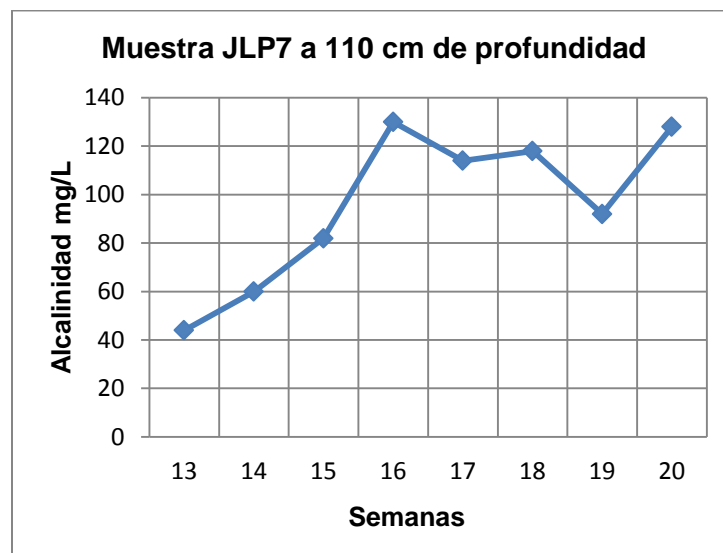


Figura 10.57. Gráfica de alcalinidad de la muestra JLP7.

Tabla 10.10. Resultados de pH, conductividad eléctrica, temperatura, fecha y hora de la aplicación del lavado, registro de volúmenes de entrada y salida y la alcalinidad del lixiviado de la muestra JLP8 la cual se extrajo a una profundidad de 120cm de la presa número 2

Muestra JLP8								
Tiempo	pH	CE (μS/cm)	T (°C)	Fecha	Hora	Volumen añadido (mL)	Volumen salida (mL)	Alcalinidad (mg/L)
Semana 0	7.58	3045	21.6	14/07/2015	10:30	200	74	
Semana 1	7.73	2064	20.8	21/07/2015	10:30	100	78	
Semana 2	7.32	1746	19.5	28/07/2015	10:30	100	84	
Semana 3	7.94	1337	22.3	04/08/2015	10:30	100	82	
Semana 4	8.22	713	20.3	11/08/2015	10:30	100	77	
Semana 5	7.62	902	20.5	18/08/2015	10:30	100	84	
Semana 6	7.59	1242	20.2	25/08/2015	10:30	100	80	
Semana 7	7.57	1326	20.3	01/09/2015	10:30	100	78	
Semana 8	7.05	1223	21.8	08/09/2015	10:30	100	70	
Semana 9	8.12	1016	20.5	15/09/2015	10:30	100	74	
Semana 10	7.86	987	21.6	22/09/2015	10:30	100	74	
Semana 11	8.06	258	18.6	29/09/2015	10:30	100	74	
Semana 12	8.03	874	20.9	06/10/2015	10:30	100	75	
Semana 13	8.19	801	21.6	13/10/2015	10:30	100	79	50
Semana 14	8.01	1027	18.3	20/10/2015	10:30	100	80	94
Semana 15	8.33	709	19.6	27/10/2015	10:30	100	75	68
Semana 16	8.30	671	23.9	03/11/2015	10:30	100	80	120
Semana 17	7.93	576	19.2	10/11/2015	10:30	100	97	110
Semana 18	8.21	518	20.2	17/11/2015	10:30	100	88	116
Semana 19	8.05	491	18.8	24/11/2015	10:30	100	85	100
Semana 20	8.00	495	18.3	01/12/2015	10:30	100	81	136

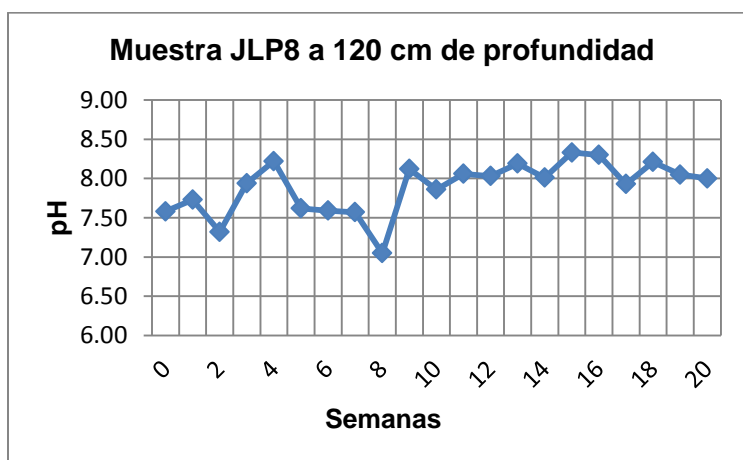


Figura 10.58. Gráfica de pH de la muestra JLP8.

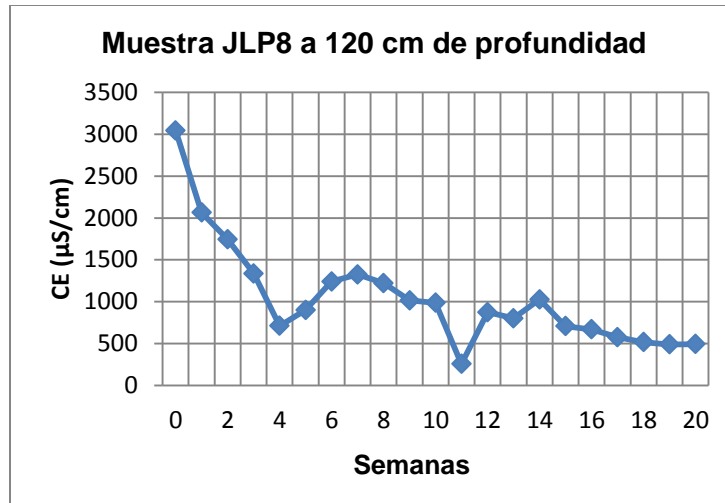


Figura 10.59. Gráfica de conductividad eléctrica de la muestra JLP8.

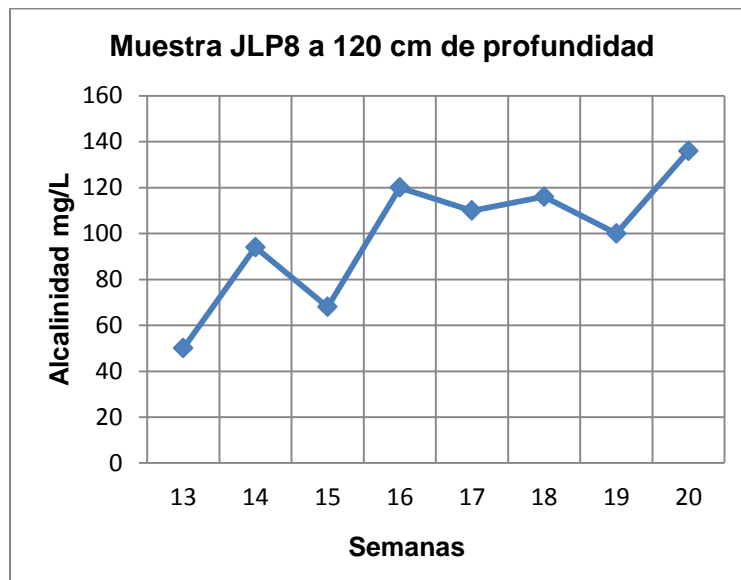


Figura 10.60. Gráfica de alcalinidad de la muestra JLP8.

Tabla 10.11. Resultados de pH, conductividad eléctrica, temperatura, fecha y hora de la aplicación del lavado, registro de volúmenes de entrada y salida y la alcalinidad del lixiviado de la muestra JLP9, la cual se extrajo a una profundidad de 30 cm de la presa número 1

Muestra JLP9								
Tiempo	pH	CE (μS/cm)	T (°C)	Fecha	Hora	Volumen añadido (mL)	Volumen salida (mL)	Alcalinidad (mg/L)
Semana 0	8.13	1887	21.5	14/07/2015	10:30	200	75	
Semana 1	7.55	1806	20.4	21/07/2015	10:30	100	82	
Semana 2	7.10	1694	19.5	28/07/2015	10:30	100	76	
Semana 3	7.78	1767	22.2	04/08/2015	10:30	100	98	
Semana 4	7.85	1678	20.1	11/08/2015	10:30	100	95	
Semana 5	7.54	1686	20.4	18/08/2015	10:30	100	82	
Semana 6	7.39	1644	19.9	25/08/2015	10:30	100	79	
Semana 7	7.23	1618	19.8	01/09/2015	10:30	100	77	
Semana 8	6.29	1581	21.9	08/09/2015	10:30	100	75	
Semana 9	8.14	1642	20.5	15/09/2015	10:30	100	96	
Semana 10	7.88	1580	21.1	22/09/2015	10:30	100	99	
Semana 11	8.04	1490	18.6	29/09/2015	10:30	100	98	
Semana 12	7.88	736	20.9	06/10/2015	10:30	100	80	
Semana 13	8.14	1164	21.3	13/10/2015	10:30	100	74	64
Semana 14	8.00	1465	18.1	20/10/2015	10:30	100	79	88
Semana 15	8.28	1277	19.7	27/10/2015	10:30	100	97	86
Semana 16	8.31	510	23.7	03/11/2015	10:30	100	98	65
Semana 17	8.04	572	19.0	10/11/2015	10:30	100	98	80
Semana 18	8.28	415	20.2	17/11/2015	10:30	100	90	66
Semana 19	7.99	416	18.6	24/11/2015	10:30	100	96	56
Semana 20	8.01	335	18.0	01/12/2015	10:30	100	78	72

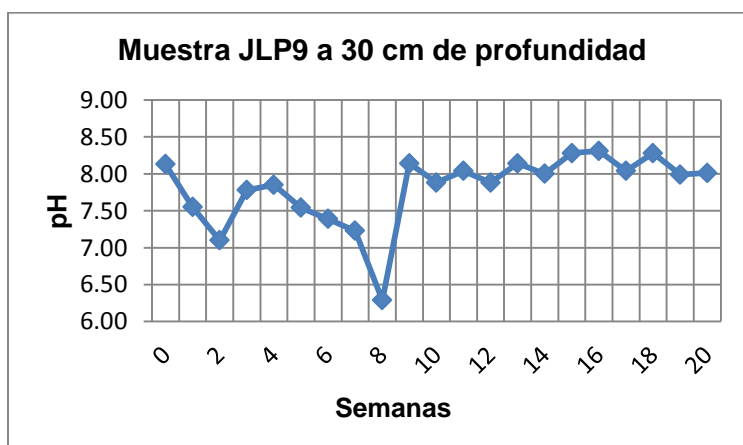


Figura 10.61. Gráfica de pH de la muestra JLP9.

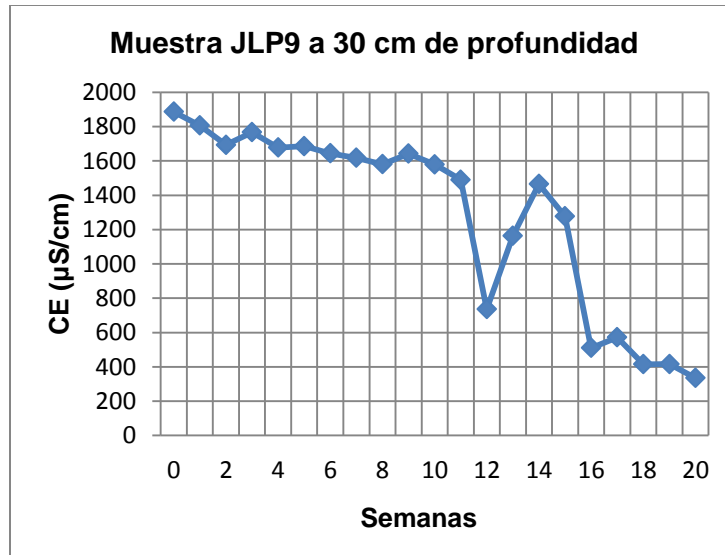


Figura 10.62. Gráfica de conductividad eléctrica de la muestra JLP9.

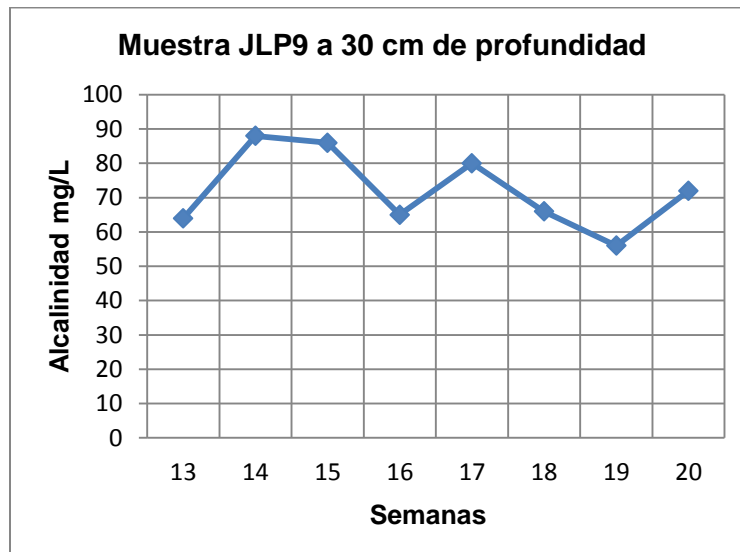


Figura 10.63. Gráfica de alcalinidad de la muestra JLP9.

Tabla 10.12. Resultados de pH, conductividad eléctrica, temperatura, fecha y hora de la aplicación del lavado, registro de volúmenes de entrada y salida y la alcalinidad del lixiviado de la muestra JLP10, la cual se extrajo a una profundidad de 55cm de la presa número 1

Muestra JLP10								
Tiempo	pH	CE (μS/cm)	T (°C)	Fecha	Hora	Volumen añadido (mL)	Volumen salida (mL)	Alcalinidad (mg/L)
Semana 0	7.83	1649	21.7	14/07/2015	10:30	200	76	
Semana 1	7.89	1763	20.5	21/07/2015	10:30	100	72	
Semana 2	7.24	1530	19.8	28/07/2015	10:30	100	81	
Semana 3	8.06	860	22.0	04/08/2015	10:30	100	88	
Semana 4	8.17	586	20.3	11/08/2015	10:30	100	87	
Semana 5	7.66	473	20.7	18/08/2015	10:30	100	76	
Semana 6	7.49	402	20.1	25/08/2015	10:30	100	79	
Semana 7	7.17	450	20.1	01/09/2015	10:30	100	96	
Semana 8	6.48	435	21.9	08/09/2015	10:30	100	72	
Semana 9	8.17	450	20.5	15/09/2015	10:30	100	86	
Semana 10	7.98	398	21.2	22/09/2015	10:30	100	74	
Semana 11	8.06	356	18.0	29/09/2015	10:30	100	80	
Semana 12	8.03	324	20.9	06/10/2015	10:30	100	75	
Semana 13	8.31	292	21.4	13/10/2015	10:30	100	76	98
Semana 14	8.04	271	18.1	20/10/2015	10:30	100	85	88
Semana 15	8.39	268	20.0	27/10/2015	10:30	100	97	86
Semana 16	8.35	309	24.3	03/11/2015	10:30	100	78	130
Semana 17	8.07	288	19.2	10/11/2015	10:30	100	77	136
Semana 18	8.18	308	20.5	17/11/2015	10:30	100	76	136
Semana 19	7.96	276	18.8	24/11/2015	10:30	100	80	108
Semana 20	7.89	302	18.2	01/12/2015	10:30	100	96	124

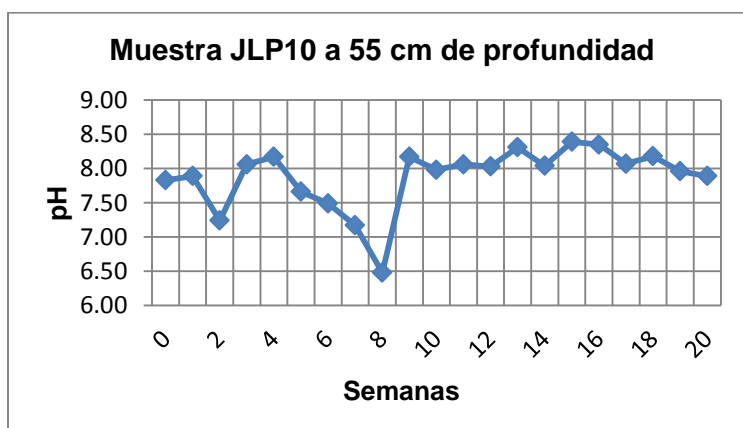


Figura 10.64. Gráfica de pH de la muestra JLP10.

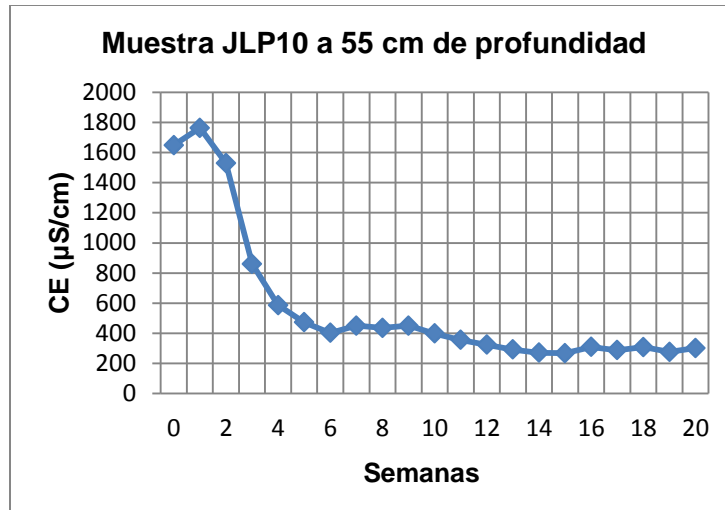


Figura 10.65. Gráfica de conductividad eléctrica de la muestra JLP10.

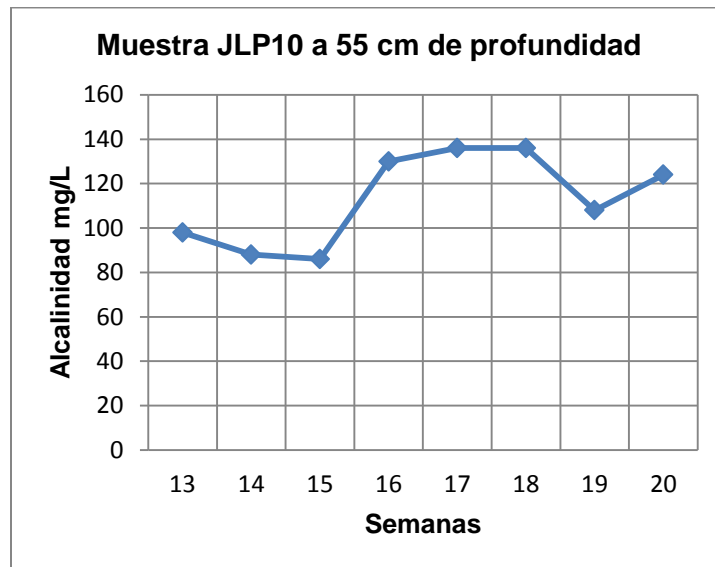


Figura 10.66. Gráfica de alcalinidad de la muestra JLP10.

Tabla 10.13. Resultados de pH, conductividad eléctrica, temperatura, fecha y hora de la aplicación del lavado, registro de volúmenes de entrada y salida y la alcalinidad del lixiviado de la muestra JLP11, la cual se extrajo a una profundidad de 30cm en un sitio alejado de las presas de jales, siendo la muestra testigo

Muestra JLP11								
Tiempo	pH	CE (μS/cm)	T (°C)	Fecha	Hora	Volumen añadido (mL)	Volumen salida (mL)	Alcalinidad (mg/L)
Semana 0	8.58	317	21.0	14/07/2015	10:30	200	79	
Semana 1	8.21	522	20.1	21/07/2015	10:30	100	78	
Semana 2	7.59	591	19.6	28/07/2015	10:30	100	74	
Semana 3	8.25	538	22.1	04/08/2015	10:30	100	73	
Semana 4	8.32	481	19.7	11/08/2015	10:30	100	79	
Semana 5	7.92	450	20.1	18/08/2015	10:30	100	80	
Semana 6	7.67	469	19.8	25/08/2015	10:30	100	70	
Semana 7	7.45	549	19.8	01/09/2015	10:30	100	77	
Semana 8	7.32	452	21.8	08/09/2015	10:30	100	75	
Semana 9	8.28	383	20.2	15/09/2015	10:30	100	70	
Semana 10	8.01	375	21.2	22/09/2015	10:30	100	75	
Semana 11	8.28	345	18.6	29/09/2015	10:30	100	74	
Semana 12	8.24	338	20.4	06/10/2015	10:30	100	80	
Semana 13	8.52	326	22.0	13/10/2015	10:30	100	70	178
Semana 14	8.38	336	18.0	20/10/2015	10:30	100	75	200
Semana 15	8.87	306	19.1	27/10/2015	10:30	100	74	100
Semana 16	8.76	352	23.5	03/11/2015	10:30	100	75	260
Semana 17	8.65	360	18.3	10/11/2015	10:30	100	76	246
Semana 18	8.67	376	20.2	17/11/2015	10:30	100	77	230
Semana 19	8.67	351	18.4	24/11/2015	10:30	100	80	192
Semana 20	8.60	412	17.3	01/12/2015	10:30	100	79	256

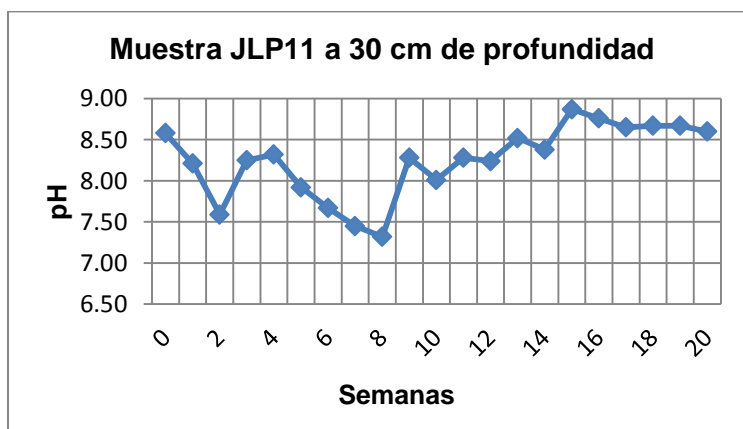


Figura 10.67. Gráfica de pH de la muestra JLP11.

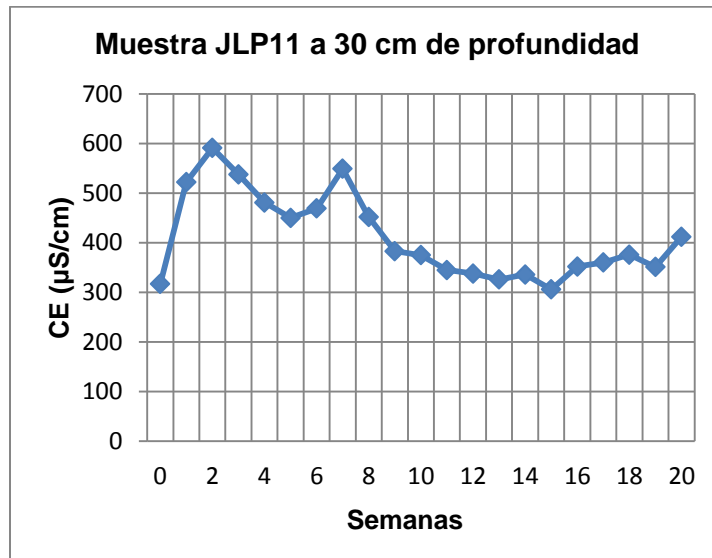


Figura 10.68. Gráfica de conductividad eléctrica de la muestra JLP11.

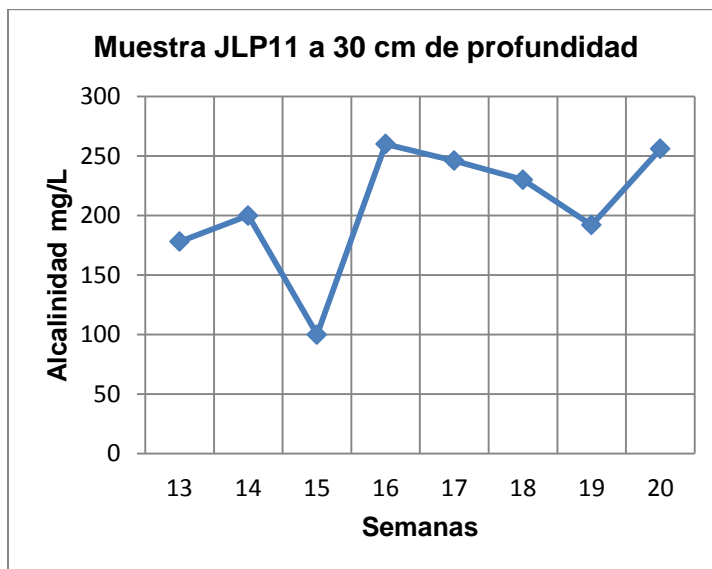


Figura 10.69. Gráfica de alcalinidad de la muestra JLP11.

Tabla 10.14. Resultados de pH, conductividad eléctrica, temperatura, fecha y hora de la aplicación del lavado, registro de volúmenes de entrada y salida y la alcalinidad del lixiviado de la muestra JLP12, la cual se extrajo a una profundidad de 30 cm de la presa número 5

Muestra JLP12								
Tiempo	pH	CE (μS/cm)	T (°C)	Fecha	Hora	Volumen añadido (mL)	Volumen salida (mL)	Alcalinidad (mg/L)
Semana 0	8.22	1009	21.2	14/07/2015	10:30	200	74	
Semana 1	7.75	1673	20.7	21/07/2015	10:30	100	81	
Semana 2	7.21	1516	20.2	28/07/2015	10:30	100	78	
Semana 3	7.90	1274	22.2	04/08/2015	10:30	100	76	
Semana 4	7.99	1169	20.3	11/08/2015	10:30	100	75	
Semana 5	7.45	1163	21.0	18/08/2015	10:30	100	93	
Semana 6	7.30	1137	20.2	25/08/2015	10:30	100	83	
Semana 7	7.01	1220	20.0	01/09/2015	10:30	100	77	
Semana 8	6.48	1178	21.7	08/09/2015	10:30	100	75	
Semana 9	7.83	1264	20.5	15/09/2015	10:30	100	95	
Semana 10	7.75	1253	21.4	22/09/2015	10:30	100	74	
Semana 11	7.83	1026	18.8	29/09/2015	10:30	100	73	
Semana 12	7.91	711	20.8	06/10/2015	10:30	100	97	
Semana 13	8.16	466	21.4	13/10/2015	10:30	100	75	80
Semana 14	7.98	380	18.0	20/10/2015	10:30	100	74	96
Semana 15	8.30	275	20.0	27/10/2015	10:30	100	97	76
Semana 16	8.41	315	23.4	03/11/2015	10:30	100	74	100
Semana 17	8.28	326	19.0	10/11/2015	10:30	100	80	132
Semana 18	8.32	340	20.3	17/11/2015	10:30	100	74	122
Semana 19	7.94	311	18.8	24/11/2015	10:30	100	81	108
Semana 20	7.91	342	18.1	01/12/2015	10:30	100	96	136

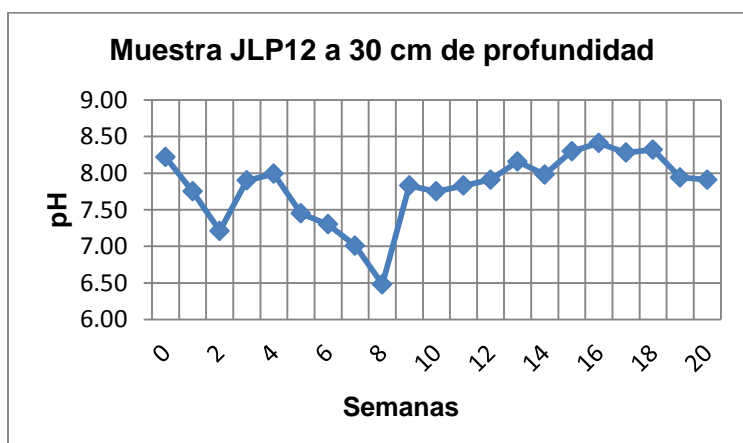


Figura 10.70. Gráfica de pH de la muestra JLP12.

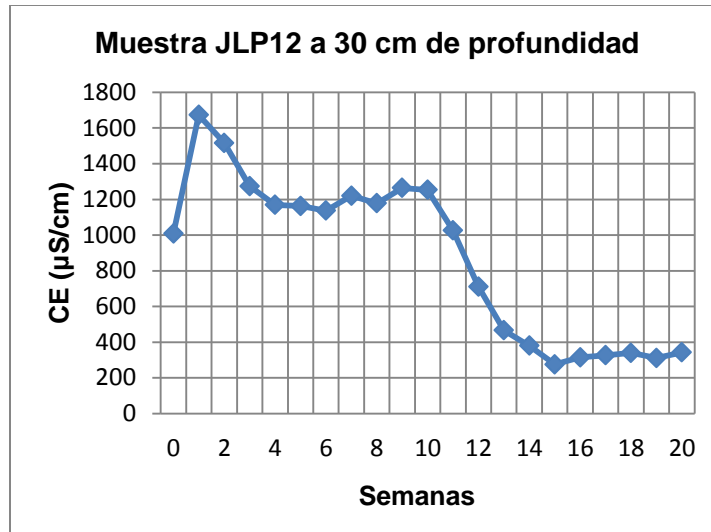


Figura 10.71. Gráfica de conductividad eléctrica de la muestra JLP12.

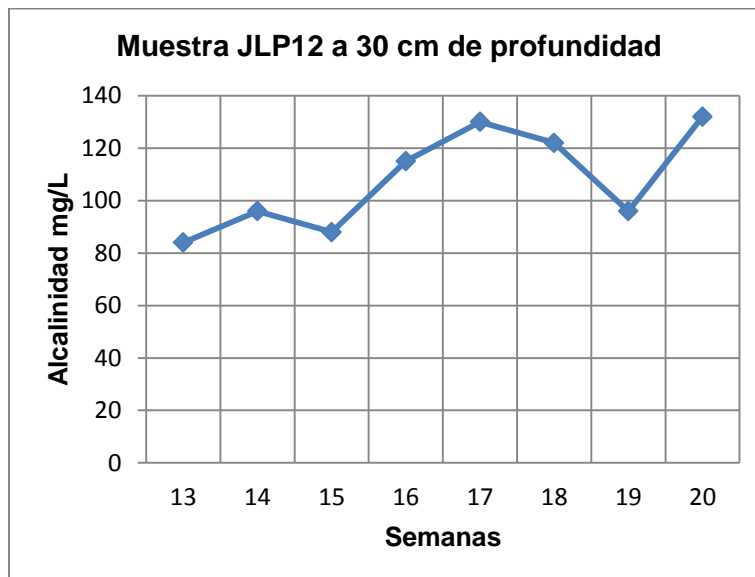


Figura 10.72. Gráfica de alcalinidad de la muestra JLP12.

Tabla 10.15. Resultados de pH, conductividad eléctrica, temperatura, fecha y hora de la aplicación del lavado, registro de volúmenes de entrada y salida y la alcalinidad del lixiviado de la muestra JLP13, la cual se extrajo a una profundidad de 50cm de la presa número 5

Muestra JLP13								
Tiempo	pH	CE (μS/cm)	T (°C)	Fecha	Hora	Volumen añadido (mL)	Volumen salida (mL)	Alcalinidad (mg/L)
Semana 0	8.25	731	21.7	14/07/2015	10:30	200	77	
Semana 1	7.86	1579	20.5	21/07/2015	10:30	100	82	
Semana 2	7.22	1352	20.5	28/07/2015	10:30	100	73	
Semana 3	8.02	625	22.4	04/08/2015	10:30	100	84	
Semana 4	8.12	512	20.4	11/08/2015	10:30	100	94	
Semana 5	7.55	461	20.3	18/08/2015	10:30	100	87	
Semana 6	7.48	413	20.4	25/08/2015	10:30	100	72	
Semana 7	7.06	410	20.3	01/09/2015	10:30	100	91	
Semana 8	6.87	353	21.8	08/09/2015	10:30	100	70	
Semana 9	8.04	324	20.7	15/09/2015	10:30	100	74	
Semana 10	7.82	315	21.5	22/09/2015	10:30	100	70	
Semana 11	7.89	270	19.0	29/09/2015	10:30	100	75	
Semana 12	7.94	249	20.8	06/10/2015	10:30	100	94	
Semana 13	8.23	238	21.7	13/10/2015	10:30	100	84	84
Semana 14	7.81	243	18.2	20/10/2015	10:30	100	90	96
Semana 15	8.16	238	19.9	27/10/2015	10:30	100	76	88
Semana 16	8.17	268	23.5	03/11/2015	10:30	100	97	115
Semana 17	8.06	262	19.2	10/11/2015	10:30	100	82	130
Semana 18	8.21	295	20.7	17/11/2015	10:30	100	90	122
Semana 19	7.88	255	18.9	24/11/2015	10:30	100	95	96
Semana 20	7.86	288	18.2	01/12/2015	10:30	100	80	132

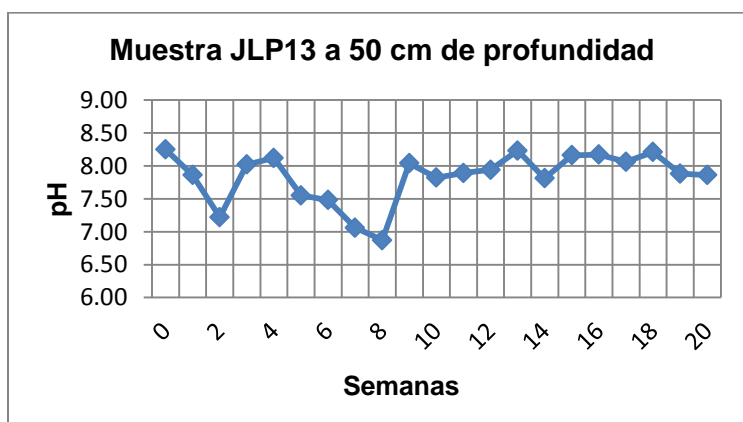


Figura 10.73. Gráfica de pH de la muestra JLP13.

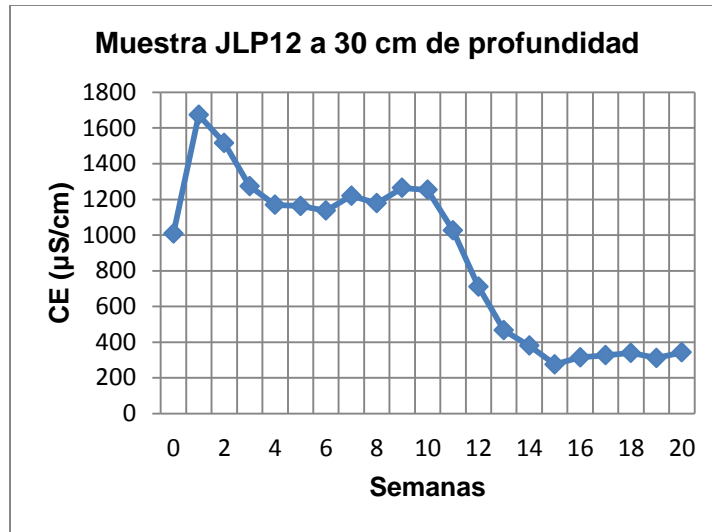


Figura 10.74. Gráfica de conductividad eléctrica de la muestra JLP13.

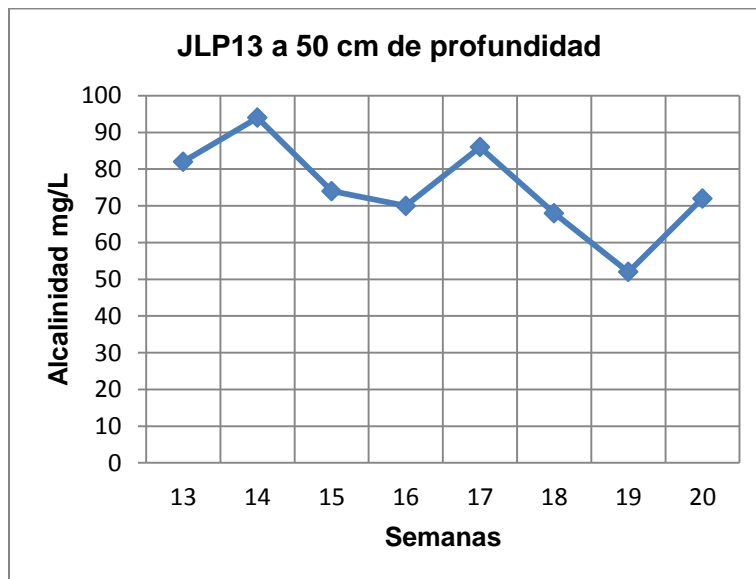


Figura 10.75. Gráfica de alcalinidad de la muestra JLP13.

Tabla 10.16. Resultados de pH, conductividad eléctrica, temperatura, fecha y hora de la aplicación del lavado, registro de volúmenes de entrada y salida y la alcalinidad del lixiviado de la muestra JLP14, la cual es duplicado de la muestra JLP7, que no se incluyó en el sistema de humidificado

Muestra JLP14								
Tiempo	pH	CE (μS/cm)	T (°C)	Fecha	Hora	Volumen añadido (mL)	Volumen salida (mL)	Alcalinidad (mg/L)
Semana 0	7.74	1332	22.1	14/07/2015	10:30	200	75	
Semana 1	8.04	1411	20.8	21/07/2015	10:30	100	81	
Semana 2	8.01	1446	19.7	28/07/2015	10:30	100	94	
Semana 3	7.81	1401	22.4	04/08/2015	10:30	100	76	
Semana 4	7.78	1345	20.5	11/08/2015	10:30	100	88	
Semana 5	7.50	1327	21.0	18/08/2015	10:30	100	89	
Semana 6	7.61	1339	20.7	25/08/2015	10:30	100	92	
Semana 7	7.54	1343	20.4	01/09/2015	10:30	100	77	
Semana 8	7.55	1402	21.9	08/09/2015	10:30	100	74	
Semana 9	7.72	1407	20.6	15/09/2015	10:30	100	77	
Semana 10	7.65	1438	21.6	22/09/2015	10:30	100	99	
Semana 11	7.72	1407	19.1	29/09/2015	10:30	100	98	
Semana 12	7.63	1443	21.6	06/10/2015	10:30	100	98	
Semana 13	7.73	1511	21.7	13/10/2015	10:30	100	97	82
Semana 14	7.74	1522	18.7	20/10/2015	10:30	100	99	94
Semana 15	7.77	1527	19.9	27/10/2015	10:30	100	97	74
Semana 16	8.14	1517	23.8	03/11/2015	10:30	100	98	70
Semana 17	8.02	1537	19.0	10/11/2015	10:30	100	74	86
Semana 18	7.97	1547	20.2	17/11/2015	10:30	100	92	68
Semana 19	7.97	1518	19.0	24/11/2015	10:30	100	75	52
Semana 20	7.92	1502	17.9	01/12/2015	10:30	100	80	72

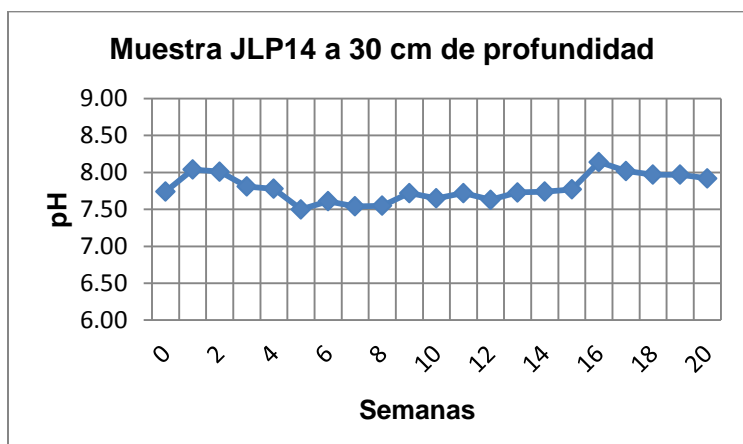


Figura 10.76. Gráfica de pH de la muestra JLP14.

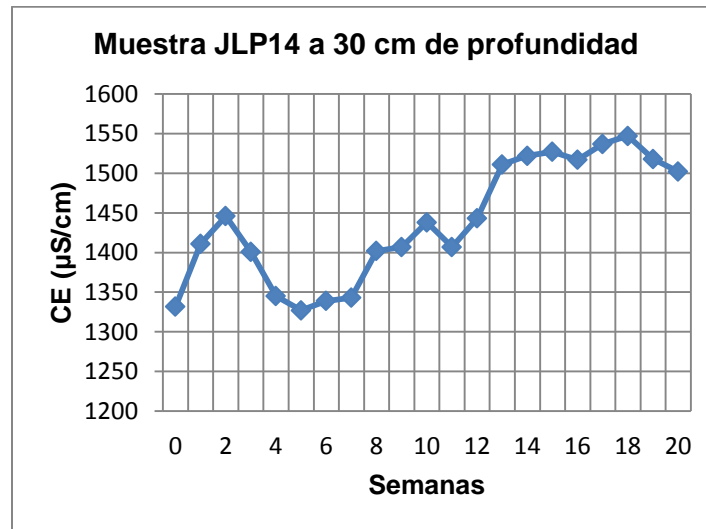


Figura 10.77. Gráfica de conductividad eléctrica de la muestra JLP14.

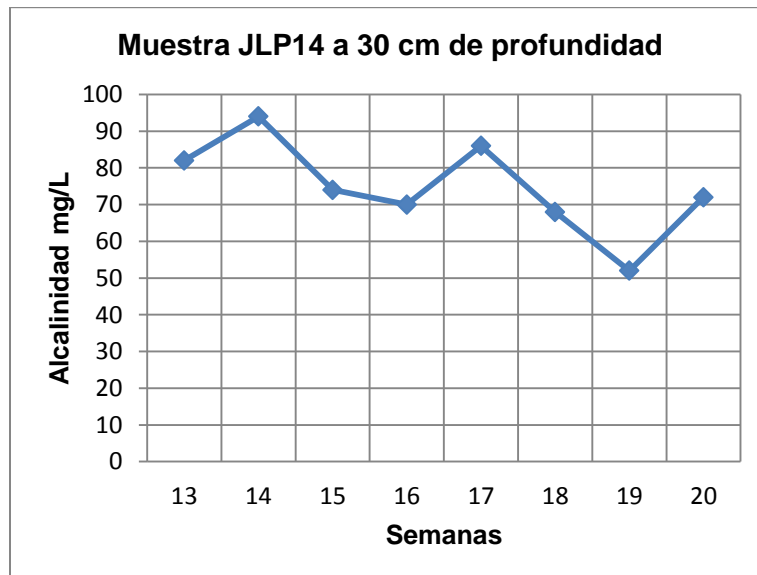


Figura 10.78. Gráfica de alcalinidad de la muestra JLP14.