



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
INSTITUTO DE GEOLOGÍA**

**Valorización, potencial de residuos  
minero-metalúrgicos: un enfoque hacia la  
minería circular**

**TESIS**

Que para optar por el título de:

**Maestra en Ciencias de la Tierra**

**P R E S E N T A**

Etzigueri Góngora Úbeda

**DIRECTOR DE TESIS**

Francisco Martín Romero

Instituto de Geología

**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., abril del 2024**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

"Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a, la obra de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales."

# AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis papás, Margarita y Gerardo por ser cada uno a su manera una base llena de amor y apoyo incondicional. Por haberme dado valores y seguridad, por hacerme pensar que yo podía conseguir cualquier cosa que me propusiera hasta que se volvió una realidad. Mami, muchas gracias por estar con mi niño todo este tiempo y ser su guardiana y amiga, sin ti no lo hubiera logrado.

Quiero agradecer a mi más grande inspiración, a mi Ferrán, que desde que llegó a mi vida ha sido mi motor y que con cada sonrisa me regresa las fuerzas para luchar por mis sueños, impulsándome a trabajar por un mundo mejor, para él, para todos.

También quiero agradecer a mi mejor amigo, esposo y compañero de aventuras, Antonio, por estar conmigo en cada momento, celebrando mis triunfos, endulzando mis caídas y haciéndome ser mejor persona. Por tu apoyo emocional e intelectual en este camino tan nuestro.

Quiero agradecer a mi hermano Alexis por siempre estar, por ser el brazo derecho de todos, del que he aprendido la nobleza y la entrega. A mi hermana Geraldine, que a la distancia celebra mis logros, mandando su amor y apoyo multiplicado por 5.

A mi bubu, por ser el amor y cuidado materializado en esta tierra; porque cada segundo que me ha dado, han sido pequeños ladrillos para formar a la mujer que soy ahora.

A Lety y Pepe por su gran cariño y apoyo constante en este camino.

# AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer profundamente a mi asesor de tesis, Dr. Francisco Martín Romero, por el apoyo incondicional, consejos y sobre todo excelente guía. También, por confiar en mí y darme la libertad de proponer y desarrollar mis ideas para la realización de este proyecto.

También expreso mi agradecimiento a los miembros de mi jurado de grado: Dr. Martín Andrés Valencia Moreno, Dr. Luis Gerardo Martínez Jardines, Dr. José Enrique Santos Jallath y Dr. Israel Razo Soto, que por su apoyo y experiencia brindada durante la gestación y revisión de este proyecto fueron una pieza clave en la consolidación de mis ideas.

Gracias a mis profesores del posgrado, al Instituto de Geología, al Posgrado en Ciencias de la tierra y sobre todo al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología por el apoyo otorgado en mis estudios de posgrado.

Reconozco y agradezco el apoyo brindado y colaboración en los análisis de laboratorio: Ing. Carlos Linares y Dr. Daniel Ramos Pérez.

A todo el laboratorio de Geoquímica ambiental y en especial a Alicia Santana Silva, Astrid Ameyalli Vázquez Salgado, Angel Leonardo Alvirde Meléndez, Jessica Anaid Hernández Cano y Leticia Hernández Isabel, por su apoyo en el laboratorio, logística, muestreo, cariño y amistad.

Finally, I express my gratitude to Greg Wessel for making this world a better place for everyone, for showing me what a true leader is, and for being my mentor and friend along this journey.

*Esta tesis te la dedico a ti, mi Ferrán, para que recuerdes que la libertad más grande se encuentra al hacer lo que amas y al volar a lugares a los que algún día pareció imposible llegar.*

# ÍNDICE

---

---

<b>Resumen</b> .....	<b>14</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>17</b>
<b>1 Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 La minería y sus retos actuales</b> .....	<b>1</b>
1.1.1 Generalidades.....	1
1.1.2 La Economía Circular y la Economía Circular en la minería .....	3
<b>1.2 Residuos generados por la industria minera</b> .....	<b>12</b>
1.2.1 ¿Qué son y cómo se generan?.....	12
1.2.2 Los residuos como potencial peligro o recurso .....	14
1.2.3 Mineralogía de los residuos, su caracterización e importancia .....	16
<b>1.3 Regulación y manejo de residuos en México</b> .....	<b>31</b>
<b>1.4 Valorización de residuos mineros</b> .....	<b>33</b>
1.4.1 Antecedentes .....	33
1.4.2 La valorización de residuos y los Objetivos de desarrollo sostenible (ODS) de la ONU .....	34
<b>1.5 Elementos Críticos</b> .....	<b>35</b>
1.5.1 ¿Qué son y cómo se definen? .....	35
1.5.2 Materiales o Elementos Críticos en el mundo .....	37
1.5.3 Los Elementos Críticos en Latinoamérica y México .....	45
1.5.4 Cómo se encuentran los Elementos Críticos .....	46
<b>2 Objetivos e hipótesis</b> .....	<b>48</b>
<b>3 Sitios de Estudio</b> .....	<b>50</b>
<b>3.1 Cananea, Sonora</b> .....	<b>50</b>
3.1.1 Ubicación y contexto geográfico.....	50
3.1.2 Contexto geológico y minero de Sonora y Cananea .....	51
3.1.3 Pórfidos de cobre y sus subproductos .....	53
3.1.4 Residuos de Cananea, Sonora y jales históricos (Represo de la concentradora vieja) ..	56
<b>3.2 Matehuala, San Luis Potosí</b> .....	<b>62</b>
3.2.1 Ubicación y contexto geográfico.....	62

3.2.2	Contexto Geológico y Minero de San Luis Potosí y Matehuala .....	63
3.2.3	Yacimientos tipo skarn y sus subproductos .....	64
3.2.4	Residuos de Matehuala.....	69
<b>4.</b>	<b><i>Metodología y Experimentación</i></b> .....	<b>75</b>
<b>4.1</b>	<b>Propuesta de Modelo de manejo de residuos para la minería basado en la Economía Circular.....</b>	<b>75</b>
<b>4.2</b>	<b>Propuesta de clasificación de Elementos/Materiales Estratégicos para México.....</b>	<b>76</b>
<b>4.3</b>	<b>Potencial de Valorización (Casos de estudio) .....</b>	<b>77</b>
4.3.1	Cananea, Sonora .....	79
4.3.2	Matehuala, San Luis Potosí.....	85
<b>5.</b>	<b><i>Resultados y Discusión</i></b> .....	<b>90</b>
<b>5.1</b>	<b>Las 4 Rs y El Modelo de Economía Circular para la minería .....</b>	<b>90</b>
5.1.1	Las 4 Rs .....	90
5.1.2	El modelo de Economía Circular para la minería.....	92
<b>5.2</b>	<b>Propuesta de Elementos/Materiales Estratégicos para México.....</b>	<b>103</b>
5.2.1	Factores Internos: potencial y necesidades .....	104
5.2.2	Factores Externos: oportunidades y estrategia .....	115
5.2.3	Materiales Estratégicos y su clasificación .....	121
<b>5.3</b>	<b>Potencial de valorización de Cananea, Sonora.....</b>	<b>125</b>
5.3.1	Caracterización Física .....	125
5.3.2	Características Químicas y Geoquímicas .....	126
5.3.3	Mineralogía .....	134
<b>5.4</b>	<b>Potencial de valorización de Matehuala, san luis potosí.....</b>	<b>144</b>
5.4.1	Caracterización física .....	144
5.4.2	Características Químicas y Geoquímicas .....	144
5.4.2	Mineralogía .....	148
<b>6</b>	<b><i>Conclusiones</i></b> .....	<b>158</b>
	<b><i>Referencias</i></b> .....	<b>166</b>

# ANEXOS

ANEXO. 1 IMPORTACIONES TOTALES EN MILES DE DÓLARES POR PRODUCTO, LOS VALORES SE PRESENTAN EN MILES DE DÓLARES Y LOS PRODUCTOS SE ENCUENTRAN ORDENADOS DE ACUERDO CON SU PARTICIPACIÓN EN LA IMPORTACIÓN TOTAL. INFORMACIÓN OBTENIDA DE BANXICO. ....	177
ANEXO. 2 EXPORTACIONES TOTALES EN MILES DE DÓLARES POR PRODUCTO, LOS VALORES SE PRESENTAN EN MILES DE DÓLARES Y LOS PRODUCTOS SE ENCUENTRAN ORDENADOS DE ACUERDO CON SU PARTICIPACIÓN EN LA EXPORTACIÓN TOTAL. INFORMACIÓN OBTENIDA DE BANXICO. ....	180
ANEXO. 3 PRODUCCIÓN DE MINERALES EN EL 2021, PARTICIPACIÓN DE MÉXICO EN VOLÚMEN Y PORCENTAJE, ASÍ COMO EL MAYOR PRODUCCIÓN Y SU PORCENTAJE DE PARTICIPACIÓN. ....	183
ANEXO. 4 ESTABILIDAD POLÍTICA DE LOS PAÍSES PRODUCTORES, DE CADA ELEMENTO O PRODUCTO MINERAL. ....	185
ANEXO. 5 CONCENTRACIONES DE ELEMENTOS EN JALES Y ENRIQUECIMIENTOS DE LOS ELEMENTOS NORMALIZADOS CON LOS VALORES DE LA CORTEZA CONTINENTAL SUPERIOR (UCC). ....	187
ANEXO. 6 CONCENTRACIONES DE ELEMENTOS EN JALES Y ENRIQUECIMIENTOS DE LOS ELEMENTOS NORMALIZADOS CON LOS VALORES DE FONDO DE CANANEA, SONORA (SRUB). ....	189
ANEXO. 7 TABLA DE CONVERSIÓN DE TIERRAS RARAS A ÓXIDOS Y CÁLCULO DE EL FACTOR DE CONVERSIÓN. ....	190
ANEXO. 8 CÁLCULO DE TREC (SUMATORIA DE LAS CONCENTRACIONES DE TIERRAS RARAS) EN LOS JALES DE CANANEA, SONORA. ....	191
ANEXO. 9 DIFRACTOGRAMA DE MUESTRA DE ZANJA DE PROFUNDIDAD 2(0-25 CM). ....	191
ANEXO. 10 DIFRACTOGRAMA DE MUESTRA DE ZANJA DE PROFUNDIDAD (100-150 CM). ....	192
ANEXO. 11 DIFRACTOGRAMA DE MUESTRA DE ZANJA DE PROFUNDIDAD (150-200). ....	192
ANEXO. 12 DIFRACTOGRAMA DE MUESTRA DE ZANJA DE PROFUNDIDAD (200-250). ....	193
ANEXO. 13 DIFRACTOGRAMA DE MUESTRA DE ZANJA DE PROFUNDIDAD 2(50-100 CM). ....	193
ANEXO. 14 DIFRACTOGRAMA DE MUESTRA DE ZANJA DE PROFUNDIDAD 2(150-200 CM). ....	193
ANEXO. 15 DIFRACTOGRAMA DE MUESTRA DE ZANJA DE PROFUNDIDAD (50-100 CM). ....	194
ANEXO. 16 DIFRACTOGRAMA DE FRACCIÓN DE MUESTRA DE ZANJA >2 MILÍMETROS. ....	194
ANEXO. 17 DIFRACTOGRAMA DE FRACCIÓN DE MUESTRA DE ZANJA 0.037-0.074 MILÍMETROS ....	195
ANEXO. 18 MAPEOS ELEMENTALES DE ELEMENTOS DISPERSOS EN FRACCIÓN >2MM (AS, MN, MO, GA). ....	195

ANEXO. 19 MAPEOS ELEMENTALES DE ELEMENTOS DISPERSOS EN FRACCIÓN >2MM (P Y PB). .....	196
ANEXO. 20 CONCENTRACIONES DE ELEMENTOS EN SUELOS CONTAMINADOS Y ENRIQUECIMIENTOS CON RESPECTO A LAS CONCENTRACIONES EN LA CORTEZA CONTINENTAL SUPERIOR. ....	196
ANEXO. 21 CONCENTRACIONES DE ELEMENTOS EN ESCORIAS Y ENRIQUECIMIENTOS CON RESPECTO A LAS CONCENTRACIONES EN LA CORTEZA CONTINENTAL SUPERIOR. ....	198
ANEXO. 22 CONVERSIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS ELEMENTOS EN LAS ESCORIAS DE PPM A WT. % DE LOS ÓXIDOS DE REE.....	199
ANEXO. 23 ANÁLISIS CON EDS EN ESCORIAS PULIDAS. EL SITIO ANALIZADO SE MUESTRA CON UN CÍRCULO AMARILLO. ZONA DE ESTUDIO CON ALTAS CONCENTRACIONES DE SB. ....	200
ANEXO. 24 MAPEO ELEMENTAL DE ESCORIAS PULIDAS DE LAS INCLUSIONES POLIMETÁLICAS, REALIZADO POR MICROSCOPIO ELECTRÓNICO Y EDS. ....	201
ANEXO. 25 MAPEOS DE LOS ELEMENTOS PRESENTES EN UNA INCLUSIÓN DE ESCORIAS VÍTREAS. ANALIZADO CON MICROSCOPIO ELECTRÓNICO Y EDS. ....	202
ANEXO. 26 ANÁLISIS CON EDS EN ESCORIAS PULIDAS. EL SITIO ANALIZADO SE MUESTRA CON UN CÍRCULO AMARILLO. ZONA DE ANÁLISIS QUE PRESENTÓ LAS CONCENTRACIONES MÁS ELEVADAS DE PLATA ASOCIADO A S Y A CU CON PRESENCIA DE FE Y PB. ....	203
ANEXO. 27 DIFRACTOGRAMA DE MUESTRA 666 DE SUELOS CONTAMINADO DE MATEHUALA. ....	204
ANEXO. 28 DIFRACTOGRAMA DE MUESTRA 664 DE SUELO CONTAMINADO DE MATEHUALA. ....	204
ANEXO. 29 DIFRACTOGRAMA DE MUESTRA 657 DE SUELO CONTAMINADO DE MATEHUALA. ....	205
ANEXO. 30 DIFRACTOGRAMA DE MUESTRA DE SUELO 654 CONTAMINADO DE MATEHUALA. ....	205

## FIGURAS

FIG. 1 JERARQUÍA DE MANEJO DE RESIDUOS. ADAPTADO Y MODIFICADO DE LÉBRE ET AL. (2016).....	10
FIG. 2 JERARQUÍA DE REHABILITACIÓN DE SITIOS DE MINA. ADAPTADO Y MODIFICADO DE LOTTERMOSE (2011). ....	11
FIG. 3 FLUJO DE PRODUCTOS Y RESIDUOS EN LA MINERÍA METÁLICA. ADAPTADO DE RAMPACEK (1982) Y DE ACUERDO CON LEY MINERA (1992). ....	12
FIG. 4 CARACTERÍSTICAS QUE HACEN A LOS RESIDUOS MINERO-METALÚRGICOS POTENCIALMENTE PELIGROSOS. ....	14

FIG. 5 REPRESENTACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE UN METAL EN UNA ROCA: (IZQ.) CON UNA CONCENTRACIÓN DE 1% Y (DER.) CON UNA CONCENTRACIÓN DEL 0.1%.....	15
FIG. 6 OPCIONES PARA EL MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS. INFORMACIÓN TOMADA Y ADAPTADA DE LA NOM-157-SEMARNAT-2009 .....	32
FIG. 7 OBJETIVOS DEL DESARROLLO SOSTENIBLE QUE VAN DE ACUERDO CON LA VALORIZACIÓN.....	35
FIG. 8 TABLA PERIÓDICA QUE INDICA EL NÚMERO DE VECES QUE UN ELEMENTO SE HA CLASIFICADO COMO CRÍTICO EN DIFERENTES ESTUDIOS ANALIZADOS. TOMADO DE (ERDMANN Y GRAEDEL, 2011). .....	37
FIG. 9 TABLA PERIÓDICA EN DONDE SE MUESTRAN LOS ELEMENTOS CONSIDERADOS COMO CRÍTICOS PARA ESTADOS UNIDOS Y CANADÁ. LISTAS TOMADAS DE (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, DEPARTMENT OF THE INTERIOR, 2022) Y (GOVERNMENT OF CANADA, 2022).....	39
FIG. 10 EVALUACIÓN DE CRITICIDAD DEL 2020, POR PARTE DE LA COMISIÓN EUROPEA. RESULTADOS DE LA IMPORTANCIA ECONÓMICA Y EL RIESGO DE SUMINISTRO. TOMADO DE (EUROPEAN COMMISSION, 2020).....	41
FIG. 11 CUADRO DE CRITICIDAD DE MATERIAS PRIMAS DE ARGENTINA, TOMADO DE (ZAPPETTINI, 2021). DE COLOR ROJO SE MUESTRAN LOS VALORES CONSIDERADOS PARA LOS MINERALES CRÍTICOS Y DE VERDE AQUELLOS CONSIDERADOS DE IMPORTANCIA ECONÓMICA ESTRATÉGICA.....	43
FIG. 12 RUEDA DE COMPAÑÍA DE LOS METALES. EL CENTRO REPRESENTA LOS METALES PRIMARIOS Y HACIA AFUERA, SE ENCUENTRAN LOS METALES HUÉSPED. LA DISTANCIA AL CENTRO INDICA EL PORCENTAJE DE PRODUCCIÓN PRIMARIA (100%-0%). TOMADO DE (NASSAR ET AL., 2015). .....	47
FIG. 13 LOCALIZACIÓN DEL MUNICIPIO DE CANANEA, SONORA. ....	50
FIG. 14 ÁREA DE ESTUDIO EN CANANEA SONORA, ARROYOS Y RÍOS IMPORTANTES. EN EL SITIO DE MINA: DEL LADO DERECHO SE ENCUENTRA LA PRESA DE JALES Y DEL LADO IZQUIERO EL TAJO. EN EL RECUADRO VERDE, LA ZONA DE ESTUDIO CON RESIDUOS ANTIGUOS.....	51
FIG. 15 ZONEAMIENTO DE ALTERACIÓN-MINERALIZACIÓN PARA UN PÓRFIDO CUPRÍFERO (LOWELL Y GUILBERT, 1970). TOMADO DE (MURAD ET AL., 2021). .....	54
FIG. 16 MODELO ESQUEMÁTICO DEL ORIGEN Y FORMACIÓN DE DIFERENTES TIPOS DE PÓRFIDOS. TOMADO DE (ROBB, 2015).....	55
FIG. 17 RESIDUOS PRESENTES EN LA ZONA DE ESTUDIO (NORTE). ....	57
FIG. 18 DIAGRAMA EN EL QUE SE MUESTRA EL TIPO DE BENEFICIO EMPLEADO Y EL TIPO DE RESIDUOS GENERADOS, DE ACUERDO CON LA CONCENTRACIÓN DE COBRE DEL MATERIAL Y DE LA MINERALOGÍA. ....	59
FIG. 19 LOCALIZACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO, MATEHUALA, SAN LUIS POTOSÍ.....	62
FIG. 20 EVOLUCIÓN DE LAS INTRUSIONES DE SKARN EN SUS 3 FORMAS SECUENCIALES A) ETAPAS PROGRADO Y B) ETAPA RETRÓGRADO. TOMADO DE ROBB (2015). .....	67

FIG. 21 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO EN CONTEXTO REGIONAL. ....	69
FIG. 22 INSTALACIONES DE EX FUNDIDORA (IZQ.) RESIDUOS PROVENIENTES DE LA EX FUNDIDORA (DER.). ....	72
FIG. 23 UBICACIÓN DE RESTOS DE EX FUNDICIÓN Y SUELOS CONTAMINADOS POR POLVOS DE FUNDICIÓN (IZQ.) Y PILA DE ESCORIAS (DER.) EN MATEHUALA, SAN LUIS POTOSÍ. ....	73
FIG. 24 ESCORIAS UTILIZADAS COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN EN ZONAS HABITACIONALES ALEDAÑAS. ....	73
FIG. 25 DIAGRAMA E EL QUE SE MUESTRAN LOS TIPOS DE RESIDUOS PRESENTES EN LA ZONA DE ESTUDIO DE MATEHUALA, SAN LUIS POTOSÍ Y SUS ALREDEDORES. ....	74
FIG. 26 METODOLOGÍA GENERAL PARA EVALUAR EL POTENCIAL DE VALORIZACIÓN DE LOS RESIDUOS ESTUDIADOS EN CADA SITIO. ....	77
FIG. 27 METODOLOGÍA PARTICULAR PARA LOS RESIDUOS DE CANANEA, SONORA (JALES HISTÓRICOS AL NORTE DE LAS ACTIVIDADES DE EXPLOTACIÓN). ....	79
FIG. 28 MUESTREO DEL CONTROL HIDROLÓGICO NORTE EN CANANEA, SONORA. ....	80
FIG. 29 MUESTREO DE ZANJAS EN JALES HISTÓRICOS DE CANANEA, SONORA. ....	80
FIG. 30 ZONA DE MUESTREO SUPERFICIAL EN JALES DE LA CANCHA DE BÉISBOL. ....	81
FIG. 31 METODOLOGÍA EMPLEADA PARA LOS RESIDUOS DE MATEHUALA, SAN LUIS POTOSÍ (ESCORIAS Y SUELOS CONTAMINADOS POR POLVOS DE EX-FUNDICIÓN). ....	85
FIG. 32 MUESTREO EN MATEHUALA, SAN LUIS POTOSÍ. ....	86
FIG. 33 MUESTREO EN LAS ESCORIAS DE MATEHUALA (IZQ.) Y EN SUELOS CONTAMINADOS POR LA EXFUNDICIÓN (DER.). ....	86
FIG. 34 LAS 4 RS COMO ACCIÓN PARA EL MANEJO DE RESIDUOS PARA ALCANZAR EL EQUILIBRIO CON LOS MEDIOS NATURALES. ....	90
FIG. 35 MODELO DE ECONOMÍA CIRCULAR PARA LA MINERÍA, BASADO EN LAS 4 RS Y LA VALORIZACIÓN DE RESIDUOS. LA LÍNEA CONTINUA MUESTRA ....	93
FIG. 36 PROPUESTA DE DIAGRAMA DE FLUJO JERÁRQUICO DE MÉTODOS PARA LA CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE JALES, ESCORIAS Y TERREROS. ....	99
FIG. 37 FRACCIONES POR GRANULOMETRÍA DE MUESTRA COMPUESTA DE ZANJA DE LA CANCHA DE BÉISBOL. DEL LADO DERECHO, SE MUESTRA LA FRACCIÓN MAYOR A 2 MILÍMETROS, LA CUAL PRESENTA GRANOS GRUESOS Y DENSOS DE MATERIALES DIVERSOS. ....	126
FIG. 38 DIAGRAMA MULTIELEMENTAL QUE MUESTRA LA RELACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE LOS ELEMENTOS EN LOS JALES HISTÓRICOS, NORMALIZADOS CON LAS CONCENTRACIONES EN LA CORTEZA CONTINENTAL SUPERIOR (UCC) (RUDNICK, ET.AL, 2013). ....	128

FIG. 39 DIAGRAMA MULTIELEMENTAL QUE MUESTRA LA RELACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE LOS ELEMENTOS DE LOS JALES HISTÓRICOS CON VALORES DE FONDO DEL SITIO, TOMADOS DE CALMUS ET AL. (2018).....	129
FIG. 40 CORRELACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE LOS METALES EN LA FRACCIÓN GRUESA.....	134
FIG. 41 MAPEOS ELEMENTALES DEL GA, FRACCIONES MALLA 10 Y 400.....	136
FIG. 42 MAPEOS ELEMENTALES DEL RENIO, ZINC Y AZUFRE. LOS MAPEO MUESTRAN LA RELACIÓN ENTRE LOS ELEMENTOS, REVELANDO LA PRESENCIA DE UN SULFURO DE ZINC, IDENTIFICADO COMO ESFALERITA.....	139
FIG. 43 CORRELACIÓN ENTRE EL RENIO, ZINC, AZUFRE, HIERRO Y MOLIBDENO, EN LOS JALES DE LA CANCHA DE BEISBOL.....	140
FIG. 44 MAPEOS ELEMENTALES DE COBRE, HIERRO Y AZUFRE. ADEMÁS, SE PRESENTAN LAS ESPECIES IDENTIFICADAS.....	142
FIG. 45 DIAGRAMA MULTIELEMENTAL, QUE MUESTRA LA REALACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE LAS CONCENTRACIONES EN LAS ESCORIAS Y EN LOS SUELOS CONTAMINADOS DE MATEHUALA, NORMALIZADOS CON LAS CONCENTRACIONES EN LA CORTEZA CONTINENTAL SUPERIOR (UCC) (RUDNICK, ET.AL, 2013).....	146
FIG. 46 DIFRACTOGRAMA DE MUESTRA DE ESCORIAS DE MATEHUALA.....	149
FIG. 47 DIFRACTOGRAMA 2 DE MUESTRAS DE ESCORIAS DE MATEHUALA.....	149
FIG. 48 INCLUSIONES POLIMETÁLICAS EN MATRIZ VÍTREA DE LAS ESCORIAS DE MATEHUALA, SAN LUIS POTOSÍ. OBTENIDO POR ESPECTROSCOPIA DE ENERGÍA DISPERSIVA (EDS, POR SUS SIGLAS EN INGLÉS) ACOPLADO EN MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO. (A) SULFURO DE PB CON CU, FE Y PRESENCIA DE AG EN FORMA CIRCULAR; (B) SULFURO DE CU Y FE EN INCLUSIÓN CIRCULAR EN MATRIZ DE VIDRIO; (C) INCLUSIÓN IRREGULAR POLIMETÁLICA CON DIFERENTES TEXTURAS: (TEXTURA TIPO MIRMEKITA) ES UN SULFURO DE PB Y CU, (GRIS CLARO EN EL CENTRO, CON PEQUEÑOS PUNTOS BLANCOS) ES UN SULFURO PRINCIPALMENTE DE CU Y SB Y (GRIS OSCURO CON LÍNEAS MÁS CLARAS) ES UN SULFURO DE CU Y FE; (D) SULFURO DE FE Y ZN CON COBRE EN FORMA DE INCLUSIÓN ALARGADA EN MATRIZ VÍTREA; (E) INCLUSIÓN CIRCULAR DE SULFURO DE CU Y FE (CLAROS); (F) INCLUSIÓN POLIMETÁLICA CON TRES FASES IDENTIFICADAS: (MANCHAS CLARAS EN LA INCLUSIÓN) SULFUROS DE CU, PB Y FE CON PRESENCIA DE AG, (ZONA DE PEQUEÑAS PARTÍCULAS COLOR GRIS CLARO) FRACCIÓN POLIMETÁLICA DE CU, S, FE Y AG PRINCIPALMENTE Y (FRACCIÓN LISA GRIS OSCURO) FASE POLIMETÁLICA DE FE CON CU, PB Y AG; (G) PRECIPITADO DE PB Y SI EN MATRIZ DE VIDRIO Y (H) PRECIPITADO POLIMETÁLICO DE DOS FASES: (GRIS CLARO) SULFURO DE FE Y CU Y (GRIS OSCURO) SULFURO DE FE.....	152

## TABLAS

TABLA 1 PROCESOS Y CARACTERÍSTICAS DE LOS RESIDUOS, EN CADA ETAPA INVOLUCRADA EN LA OBTENCIÓN DE METALES. INFORMACIÓN TOMADA DE LOTTERMOSE (2010).....	13
TABLA 2 EJEMPLOS DE MINERALES PRIMARIOS (SULFUROS), MODIFICADO DE JAMIESON (2011).....	18

TABLA 3 EJEMPLOS DE MINERALES SECUNDARIOS, MODIFICADO DE JAMIESON (2011). .....	18
TABLA 4 COMPUESTOS FORMADOS POR EL PROCESAMIENTO, TOMADO DE JAMIESON ET AL. (2015). .....	19
TABLA 5 TÉCNICAS ANALÍTICAS EMPLEADAS PARA LA CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE RESIDUOS DE MINERO-METALÚRGICOS. ADAPTADO Y MODIFICADO DE JAMIESON (2011). ...	24
TABLA 6 TIPOS DE RESIDUOS DE CANANEA, SONORA; SU RELACIÓN CON EL PORCENTAJE DE CU, MINERALOGÍA Y MÉTODO DE BENEFICIO/CONCENTRACIÓN (SEMARNAT, 2023).....	60
TABLA 7 PARTICIPACIÓN EN EL PIB NACIONAL Y LA PRODUCCIÓN EN MILLONES DE PESOS DEL AÑO 2022 A PRECIOS DE 2013 TRIMESTRAL. A LA DERECHA SE MUESTRA EL LUGAR EN LA PARTICIPACIÓN DE CADA ACTIVIDAD EN EL PIB. DE COLOR VERDE, LAS ACTIVIDADES TERCIARIAS; DE COLOR AZUL, LAS ACTIVIDADES SECUNDARIAS Y DE AMARILLO, LAS ACTIVIDADES PRIMARIAS. ....	106
TABLA 8 APOORTE AL PRODUCTO INTERNO BRUTO DE LA INDUSTRIA MANUFACTURERA POR ACTIVIDAD, PRODUCCIÓN EN MILLONES DE PESOS A PRECIOS DE 2013 TRIMESTRAL. DEL LADO DERECHO SE MUESTRA EL LUGAR QUE OCUPA LA ACTIVIDAD EN LA PARTICIPACIÓN DEL TOTAL DE LA PRODUCCIÓN DE LAS INDUSTRIAS MANUFACTURERAS. ....	107
TABLA 9 BALANZA COMERCIAL DE PAGO DE IMPORTACIONES POR PRODUCTO. LAS IMPORTACIONES TOTALES SE PRESENTAN EN MILES DE DÓLARES E INDICAN EL LUGAR JERÁQUICO QUE OCUPAN DE ACUERDO CON SU VALOR. ....	109
TABLA 10 BALANZA COMERCIAL DE PAGO DE EXPORTACIONES POR PRODUCTO. LAS EXPORTACIONES TOTALES SE PRESENTAN EN MILES DE DÓLARES E INDICAN EL LUGAR JERÁQUICO QUE OCUPAN DE ACUERDO CON SU VALOR .....	111
TABLA 11 CATEGORÍAS DE PRODUCTOS MINERALES Y SUS PRODUCTOS, DE ACUERDO CON WORLD MINING DATA (2023).....	112
TABLA 12 PRODUCCIÓN DE ELEMENTOS O MINERALES DE MEXICO Y SU PORCENTAJE EN LA PARTICIPACIÓN MUNDIAL. EL LUGAR A NIVEL MUNDIAL PRESENTA UNA FLECHA QUE INDICA SI BAJO EN EL LUGAR DE PARTICIPACIÓN (HACIA ABAJO) O SUBIÓ SU NIVEL DE PARTICIPACIÓN (HACIA ARRIBA). EL COLOR INDICA LOS DIFERENTES GRUPO EN LA CLASIFICACIÓN DE WORLD MINING DATA.....	113
TABLA 13 MINERALES CRÍTICOS PARA ESTADOS UNIDOS Y CANADÁ. EN AMARILLO SE MUESTRAN LAS TIERRAS RARAS LIGERAS (LREE), EN VERDE LAS TIERRAS RARAS PESADAS (HREE) Y EN COLOR AZUL LOS ELEMENTOS DEL GRUPO DEL PLATINO. SE PRESENTA UN VALOR CRÍTICO, EL CUAL SE OTORGA DE ACUERDO CON LO SIGUIENTE: 1- CRÍTICO PARA SOLO UN PAÍS Y 2- CRÍTICO PARA AMBOS PAÍSES.....	118
TABLA 14 LISTA DE MINERALES ESTRATÉGICOS PARA MÉXICO. EL COLOR AMARILLO INDICA PARA UNA ESTRATEGIA EXTERIOR, EL VERDE UNA ESTRATEGIA INTERNA Y EXTERIOR Y EN NARANJA UNA ESTRATEGIA INTERIOR.....	122
TABLA 15 RELACIÓN DE PORCENTAJE POR TAMAÑO DE GRANO EN LA MUESTRA COMPUESTA DE ZANJA 1 COMPUESTA DE LA CANCHA DE BÉISBOL. ....	125

TABLA 16 RESULTADOS DE PH Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE LOS JALES HISTÓRICOS (SUPERFICIALES Y EN ZANJAS) AL NORTE DE CANANEA, SONORA. ....	126
TABLA 17 CONCENTRACIONES DE ELEMENTOS ENRIQUECIDOS Y LEYES DE CORTE EN JALES DE CANANEA, SONORA. ....	131
TABLA 18 RESULTADOS DEL ANÁLISIS POR FRX DE LA MUESTRA COMPUESTA DE ZANJA EN LA CANCHA DE BÉISBOL, POR FRACCIÓN DETERMINADA POR GRANULOMETRÍA. ....	132
TABLA 19 CORRELACIÓN ENTRE ELEMENTOS POR GRANULOMETRÍA DE MUESTRA DE ZANJA DE LA CANCHA DE BASEBALL EN CANANEA, SONORA. ....	133
TABLA 20 MINERALES PRESENTES EN LOS JALES DE CANANEA, SONORA; DE ACUERDO CON LOS RESULTADOS DE DRX DE LAS MUESTRAS DE ZANJAS A DIFERENTES PROFUNDIDADES. ....	135
TABLA 21 MINERALES PRESENTES EN LOS JALES DE CANANEA, SONORA; DE ACUERDO CON LOS RESULTADOS DE DRX DE LAS FRACCIONES >2MM Y 0.37-0.074 MM. ....	136
TABLA 22 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LAS ESCORIAS VÍTREAS Y LOS SUELOS CONTAMINADOS POR POLVOS DE FUNDICIÓN. ....	144
TABLA 23 VALORES OBTENIDOS DE PH Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN LAS ESCORIAS (EN AZUL) Y LOS SUELOS CONTAMINADOS (EN VERDE) DE MATEHUALA, SAN LUIS POTOSÍ. ....	145
TABLA 24 CONCENTRACIONES DE ELEMENTOS ENRIQUECIDOS Y LEYES DE CORTE EN ESCORIAS DE MATEHUALA, SAN LUIS POTOSÍ. ....	147
TABLA 25 CONCENTRACIONES DE ELEMENTOS ENRIQUECIDOS Y LEYES DE CORTE EN SUELOS CONTAMINADOS DE MATEHUALA, SAN LUIS POTOSÍ. ....	148
TABLA 26 FASES MINERALES DETECTADAS POR DRX EN ESCORIAS DE MATEHUALA. ....	150
TABLA 27 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA FASE VÍTREA DE LAS ESCORIAS, OBTENIDO POR ESPECTROSCOPIA DE ENERGÍA DISPERSIVA (EDS, POR SUS SIGLAS EN INGLÉS) ACOPLADO EN MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO. ....	153
TABLA 28 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS INCLUSIONES POLIMETÁLICAS. OBTENIDO POR ESPECTROSCOPIA DE ENERGÍA DISPERSIVA (EDS, POR SUS SIGLAS EN INGLÉS) ACOPLADO EN MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO. ....	154
TABLA 29 MINERALOGÍA DE LOS SUELOS CONTAMINADOS DE ACUERDO CON LA DRX. EN AZUL OSCURO (>20%), AZUL CLARO (10-20%) Y BLANCO (<10%).....	155

## RESUMEN

---

Los recursos minerales son cruciales en la actualidad para abordar preocupaciones ambientales y avanzar hacia la sostenibilidad. La transición a economías verdes ha aumentado la demanda de minerales, llevando a los estados a asegurar su suministro y designar algunos como críticos o estratégicos. Aunque México aún no ha establecido su propio listado, es crucial promover el diálogo para fortalecer la producción local y competir internacionalmente. A pesar de las críticas por su impacto ambiental y en la salud, la industria minera está adoptando prácticas más sostenibles, como planes de cierre de minas y remediación ambiental. Con el aumento de la demanda de minerales, conceptos como la Economía Circular ofrecen oportunidades para maximizar recursos a través de la reducción, el reciclaje y la reutilización, lo que podría contribuir a la remediación ambiental y una reintegración en los ecosistemas.

Esta investigación propone un modelo circular para la minería, enfocado en la valorización de residuos y su reintegración al ambiente. También incluye la elaboración de un listado de materiales estratégicos para México y el análisis del potencial de valorización de residuos en Cananea, Sonora, y Matehuala, San Luis Potosí, para determinar su potencial de recuperación de materiales estratégicos dentro del modelo circular propuesto.

Se llevó a cabo una investigación teórica analizando modelos existentes de Economía Circular (EC) aplicados a la minería, considerando las diferentes etapas mineras y de manejo de residuos minero-metalúrgicos. Se dividieron en tres etapas: la primera para determinar su potencial de valorización, la segunda centrada en aspectos técnicos y económicos para la valorización, y la tercera dirigida a mantener el equilibrio natural de los sistemas. Para integrar estas etapas en un ciclo, se consideraron sistemas naturales en equilibrio, especialmente el ciclo de las rocas, como referencia.

Para la propuesta de minerales críticos o estratégicos se basó en una revisión exhaustiva del conocimiento actual, analizando diversas listas existentes para identificar los elementos clave. Además, se realizó un análisis de los factores económicos internos y externos de México para determinar qué materiales podrían ser estratégicos, considerando su potencial, aspectos económicos, y capacidad de

producción nacional e internacional, así como los tratados comerciales y la percepción del país en el ámbito minero.

Se llevó a cabo una caracterización de residuos minero-metalúrgicos en los sitios de estudio en Cananea, Sonora (jales), y Matehuala, San Luis Potosí (escorias y suelos contaminados por antigua fundición), con el fin de determinar su potencial de valorización en un modelo de Economía Circular. Esta caracterización incluyó análisis físicos, químicos, geoquímicos y mineralógicos para identificar posibles concentraciones de elementos enriquecidos y sus especies químicas y mineralógicas. Se emplearon diversas técnicas de caracterización mineralógica según el tipo de material y las dificultades encontradas en su análisis. Con base en los resultados obtenidos, se evaluó la viabilidad de valorización de los residuos, lo que permitió determinar si era posible avanzar a una etapa de prefactibilidad.

El modelo de Economía Circular enfrenta desafíos tecnológicos, técnicos, regulatorios y empresariales, pero subraya la importancia de la colaboración entre la industria, la academia y el gobierno. Esta colaboración es clave para profundizar en el conocimiento de los residuos mineros, comprender la presencia de metales estratégicos como subproductos y desarrollar técnicas metalúrgicas más efectivas. Es esencial integrar la Economía Circular en la regulación minera y adoptar prácticas más responsables para minimizar el impacto en los entornos naturales.

En cuanto a la propuesta del listado de materiales estratégicos, se determinó que el término "estratégico" es más apropiado para el país, dada la necesidad de establecer una estrategia inicial. La lista propuesta se divide en tres clasificaciones: materiales para estrategia interna (fosfato y potasa), materiales para estrategia externa (As, Cd, grafito, Li y Ag) y materiales para estrategia interna y externa (Sb, barita, Cu, fluorita, Mg, Mn, Mo, Ti, W, U y Zn). Sin embargo, se reconoció la importancia de desarrollar el conocimiento sobre yacimientos de tierras raras y minerales no metálicos.

En el estudio de los jales históricos de Cananea, Sonora, se identificó un potencial de valorización de los siguientes elementos; Cu (2817 ppm), Ga (24.62 ppm) y Re (0.2 ppm), que presentan sus concentraciones promedio. Sin embargo, la complejidad

mineralógica presenta desafíos en la identificación de especies minerales, especialmente para Ga y Re. En contraste, se identificaron sulfuros, sulfatos y posibles óxidos de cobre. En el caso de las escorias de Matehuala, San Luis Potosí, el cobre (2354 ppm) y el zinc (28040 ppm) son atractivos para su valorización. Estos elementos se presentan como inclusiones polimetálicas en una matriz vítrea. La extracción de metales como el zinc y el cobre requerirá un enfoque similar al de la minería de roca dura. En cuanto a los suelos contaminados por polvos de fundición, las altas concentraciones de cobre (6438.17 ppm), plata (209.92 ppm) y bismuto (281.33 ppm) sugieren un potencial de valorización. Se recomienda realizar estudios de prefactibilidad para el zinc, considerando su relación con sulfatos y arseniatos. En el caso de la plata, se infiere que podría estar presente en las arcillas del suelo, mientras que para el bismuto no se pudo identificar su asociación mineral.

En ambos sitios estudiados se identificaron materiales estratégicos para México y elementos catalogados como críticos en otros países. Evaluar el potencial de valorización dentro del modelo de Economía Circular propuesto puede convertirse en una forma de aprovechar los residuos mineros como una valiosa fuente de estos materiales. A pesar de que la Economía Circular, los materiales estratégicos/críticos y el conocimiento científico sobre los residuos mineros puedan parecer conceptos dispares, están intrínsecamente relacionados. En un contexto de desafíos ambientales y una creciente demanda de minerales esenciales para la sostenibilidad, es esencial adoptar un enfoque colaborativo. Este proyecto representa un llamado a la acción para que la industria, la academia y el gobierno se unan y aborden estos desafíos en beneficio de naciones con abundantes recursos, como México.

## ABSTRACT

---

Mineral resources are crucial in today's world to address environmental concerns and move towards sustainability. The transition to green economies has increased the demand for minerals, prompting states to secure their supply and designate some as critical or strategic. Although Mexico has not yet established its own list, it is crucial to foster dialogue to strengthen local production and compete internationally. Despite criticisms for its environmental and health impacts, the mining industry is adopting more sustainable practices, such as mine closure plans and environmental remediation. As the demand for minerals rises, concepts like the Circular Economy offer opportunities to maximize resources through reduction, recycling, and reuse, potentially contributing to environmental remediation and ecosystem reintegration.

This research proposes a circular model for mining, focusing on waste valorization and reintegration into the environment. It also includes developing a list of strategic materials for Mexico and analyzing the valorization potential of waste in Cananea, Sonora, and Matehuala, San Luis Potosí, to determine their potential for recovery of strategic materials within the proposed circular model.

A theoretical investigation was conducted analyzing existing Circular Economy (CE) models applied to mining, considering different mining stages and the management of mineral-metallurgical waste. The study was divided into three stages: the first to determine their valorization potential, the second focused on technical and economic aspects of valorization, and the third aimed at maintaining the natural balance of systems. To integrate these stages into a cycle, natural systems in equilibrium, especially the rock cycle, were considered as references.

The proposal of critical or strategic minerals was based on a comprehensive review of current knowledge, analyzing various existing lists to identify key elements. Additionally, an analysis of Mexico's internal and external economic factors was conducted to determine which materials could be strategic, considering their potential, economic aspects, and national and international production capacity, as well as trade treaties and the country's perception in the mining sector.

A characterization of mineral-metallurgical waste was carried out at the study sites in Cananea, Sonora (tailings), and Matehuala, San Luis Potosí (slag and contaminated

soils), to determine their potential for valorization in a Circular Economy model. This characterization included physical, chemical, geochemical, and mineralogical analyses to identify possible concentrations of enriched elements and their chemical and mineralogical species. Various mineralogical characterization techniques were used according to the type of material and the difficulties encountered in its analysis. Based on the results obtained, the feasibility of valorization of the waste was evaluated, allowing the determination of whether it was possible to advance to a pre-feasibility stage.

The Circular Economy model faces technological, technical, regulatory, and business challenges, but underscores the importance of collaboration between industry, academia, and government. This collaboration is key to deepening understanding of mining waste, understanding the presence of strategic metals as byproducts, and developing more effective metallurgical techniques. It is essential to integrate the Circular Economy into mining regulation and adopt more responsible practices to minimize impact on natural environments.

In the case of the proposal for the list of strategic materials, it was determined that the term "strategic" is more appropriate for the country, given the need to establish an initial strategy. The proposed list is divided into three classifications: materials for internal strategy (phosphate and potash), materials for external strategy (As, Cd, graphite, Li, and Ag), and materials for internal and external strategy (Sb, barite, Cu, fluorite, Mg, Mn, Mo, Ti, W, U, and Zn). However, the importance of developing knowledge about rare earth deposits and non-metallic minerals was recognized.

In the study of the historical tailings in Cananea, Sonora, the valorization potential of the following elements was identified: Cu (2817 ppm), Ga (24.62 ppm), and Re (0.2 ppm), which present their average concentrations. However, mineralogical complexity presents challenges in the identification of mineral species, especially for Ga and Re. In contrast, copper sulfides, sulfates, and possible copper oxides were identified. In the case of the slag in Matehuala, San Luis Potosí, copper (2354 ppm) and zinc (28040 ppm) are attractive for valorization. These elements are present as polymetallic inclusions in a vitreous matrix. Extracting metals like zinc and copper will require a similar approach to hard rock mining. Regarding soils contaminated by smelting dust, high concentrations of copper (6438.17 ppm), silver (209.92 ppm), and bismuth

(281.33 ppm) suggest valorization potential. Pre-feasibility studies are recommended for zinc, considering its relationship with sulfates and arsenates. In the case of silver, it is inferred that it could be present in the soil clays, while for bismuth, its mineral association could not be identified.

In both studied sites, strategic materials for Mexico and elements classified as critical in other countries were identified. Evaluating the valorization potential within the proposed Circular Economy model can become a way to harness mining waste as a valuable source of these materials. Despite Circular Economy, critical/strategic materials, and scientific knowledge about mining waste seeming disparate concepts, they are inherently interconnected. In the context of environmental challenges and growing demand for essential minerals for sustainability, adopting a collaborative approach is essential. This project represents a call to action for industry, academia, and government to come together and address these challenges for the benefit of nations with abundant resources like Mexico.

# 1 INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 LA MINERÍA Y SUS RETOS ACTUALES

---

### 1.1.1 GENERALIDADES

---

Las operaciones mineras consisten en una serie de actividades, que son: la exploración, explotación y beneficio de minerales o sustancias (Ley Minera, 2023) de ocurrencia natural que tienen un potencial económico, caracterizados por tener una naturaleza finita. Estas actividades en conjunto buscan extraer del subsuelo, separar y concentrar elementos o compuestos aprovechables, por medio de diferentes procesos físicos y químicos. Cada una de estas etapas, produce residuos sólidos, líquidos y gaseosos, que comúnmente no tienen algún valor (Lottermoser, 2010; Cerdá Tena y Khalilova, 2016).

La demanda de materias primas para cubrir las necesidades de la sociedad actual ha llevado a la explotación de los recursos naturales a una tasa mayor a la que la tierra los produce, teniendo como consecuencia que el porcentaje promedio de los metales extraídos de los yacimientos ha disminuido (Esposito et al., 2015). El resultado de una alta demanda de metales y una baja ley es la creciente producción de residuos y su inherente costo social y ambiental.

Además de las particularidades de la industria minera, a nivel mundial surgen preocupaciones relacionadas con el cambio climático y la necesidad de reducir las emisiones de carbono. Estas preocupaciones se han reflejado en acuerdos internacionales destinados a cumplir estos objetivos. Un ejemplo destacado es el Acuerdo de París, que se firmó en 2015 como parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, el cual, tiene por objeto "...reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, en el contexto del desarrollo sostenible y de los esfuerzos por erradicar la pobreza..." (United Nations, 2015, p.3). Para alcanzar este objetivo, se busca la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y paralelamente se persigue la prosperidad y la reducción de la desigualdad mediante esfuerzos internacionales. Cada país debe presentar planes nacionales de acción climática cada cinco años, con el propósito de mantener el aumento de la temperatura global por debajo de los 2°C (United Nations, 2015).

Para lograr los ambiciosos objetivos de descarbonización es importante situarnos en la idea de que las emisiones de carbono que son generadas tendrán que ser eliminadas o drásticamente reducidas. La transición hacia las energías renovables parece ser una de las soluciones para prevenir las emisiones (Cho, 2022). Sin embargo, es crucial reconocer que el camino para lograr este objetivo se enfrenta a desafíos importantes. La demanda de energía seguirá aumentando a causa de dos factores fundamentales: el crecimiento de la población y la mejora en la calidad de vida. Actualmente, el 80% de esta demanda energética se satisface con combustibles fósiles. Por esta razón, existe una clara tendencia hacia la búsqueda de técnicas de captura y gestión de carbono, así como hacia el desarrollo de fuentes de energía limpia (Sirola, 2014).

Las energías limpias o renovables, así como la solar, eólica, fotovoltaica, entre otras; exigen el desarrollo de tecnologías altamente dependientes de la explotación de recursos minerales, ya sea por su fabricación o para el almacenamiento de la energía. Un ejemplo claro de esto es la demanda en constante aumento de los metales. La Agencia Internacional de Energía (AIE) ofrece previsiones sobre la demanda de minerales desde 2011 hasta 2040, mostrando de manera general, que en el 2020 se tuvo una demanda mineral para energías limpias aproximadamente de 7Mt, en cambio, para el año 2040 se puede duplicar o cuadruplicar en escenarios de políticas declarados o de desarrollo sostenible respectivamente (International Energy Agency, 2021).

Adicionalmente, estas proyecciones indican que el consumo más significativo de minerales, hasta el año 2020, se destina a satisfacer la demanda de redes eléctricas, en particular cobre y aluminio, los cuales representan aproximadamente el 70% de la demanda total. No obstante, se anticipa menor preponderancia en el consumo mineral de las redes eléctricas hacia las décadas de 2030 y 2040. Esto se debe al marcado crecimiento de la industria de vehículos eléctricos, con demandas considerables estimadas para el 2030 de minerales como litio 152-248 kt, níquel 647-940 kt, cobalto 106-127 kt, manganeso 102-117 kt, cobre 717-951 kt, grafito 1027-1065 kt, silicio 26 kt y tierras raras 14 kt. Asimismo, el almacenamiento en baterías, impulsado por la creciente demanda de vehículos eléctricos, se espera que crezca en un factor de 40 entre 2020 y 2040 (International Energy Agency, 2021).

A pesar de que en la actualidad el tema más hablado es el de los vehículos eléctricos, diversas fuentes de energía renovable limpia, también, tendrán un rol importante en la reducción de emisiones de carbono y la transición energética. Para su manufactura, se requieren de la misma forma, recursos minerales, como, por ejemplo: la energía eólica (cobre 217 kt, zinc 321 kt, manganeso 46 kt, cromo 29 kt, níquel 21 kt, molibdeno 6 kt en 2020, y se proyecta el uso de 8 a 11 kt de tierras raras para 2030); la energía solar (cobre 346 kt, silicio 390 kt y plata 2 kt, principalmente en 2020) y otras fuentes de generación de energía como la geotérmica y la nuclear (International Energy Agency, 2021).

En conclusión, el carácter específico que poseen las actividades mineras, la creciente demanda de recursos minerales y los posibles impactos ambientales y a la salud humana; la minería, se ha visto en la necesidad de buscar nuevas alternativas para la obtención de los productos minerales y de involucrar en sus prácticas una estructura tipo economía circular que “permita un manejo proactivo y preventivo de los residuos mineros, que como consecuencia proporcionen un beneficio medioambiental significativo, además de la posibilidad de generar un valor de estos” (Lébre et al., 2017).

---

### 1.1.2 LA ECONOMÍA CIRCULAR Y LA ECONOMÍA CIRCULAR EN LA MINERÍA

---

#### **¿Qué es la Economía Circular?**

La Economía Circular (EC) es definida en la Ley General de Economía Circular como:

Sistema de producción, distribución y consumo de bienes y servicios, orientado al rediseño y reincorporación de productos y servicios para mantener en la economía el valor y vida útil de los productos, los materiales y los recursos asociados a ellos el mayor tiempo posible, y que se prevenga o minimice la generación de residuos, reincorporándolos nuevamente en procesos productivos cíclicos o biológicos, además de fomentar cambios de hábitos de producción y consumo (Ley General de Economía Circular, 2021, p.4).

El concepto de EC ha ido tomando fuerza en diferentes industrias ya que se adapta a las exigencias sociales y ambientales que el siglo XXI demanda, el cual, presenta

un modelo económico que optimiza el rendimiento de los recursos y disminuye los riesgos de los sistemas, cerrando bucles en procesos industriales con el principal objetivo de minimizar la producción de residuos (Cerdá Tena y Khalilova, 2016); esta definición se enfoca en convertir bienes que se encuentra al fin de su de vida útil en recursos primarios necesarios para otras actividades (Stahel, 2016).

### **Situación de la Economía Circular en México**

En el marco nacional, el 12 de noviembre del 2019 se presentó en la Gaceta del Senado la propuesta de la Ley General de Economía Circular (LEY), la cual fue aprobada el 17 de noviembre del 2021 por el Senado de la República, en compatibilidad con la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos. Algunos de sus objetivos principales son el promover el uso eficiente de recursos, materiales y servicios con criterios de EC; el empleo de la valorización energética en el manejo de residuos; promover, estimular y facilitar actividades con principios de circularidad y sustentabilidad; la incorporación de las cadenas de valor a estos conceptos; impulsar las energías limpias desde la generación, uso y acceso; y la promoción de una cultura sostenible y de responsabilidad ambiental (Ley General de Economía Circular, 2021).

Además, establece que la federación tiene la facultad de emitir reglamentos y políticas públicas para la implementación de los objetivos de EC, siempre en cumplimiento de las leyes, normativas y regulaciones relacionadas con el medio ambiente y los recursos naturales.

Aquellas personas físicas y jurídicas con la obligación de presentar un Plan de Economía Circular incluyen a quienes realizan actividades de fabricación, producción, importación o manufactura de envases o empaques. Estas actividades deben registrarse ante la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (SEMARNAT); no obstante, otras actividades que deseen participar en estas iniciativas lo harán de manera voluntaria (Ley General de Economía Circular, 2021). Es importante destacar que en dicha Ley no se mencionan actividades relacionadas con la explotación directa de materias primas, tales como: la minería, hidrocarburos, silvicultura, actividades agropecuarias, entre otros. Por lo tanto, resulta evidente la necesidad de incluir estos conceptos en la LEY y el desarrollo de normativa aplicable

a dichos sectores. La principal razón para su incorporación es su rol en el suministro de materiales para las distintas actividades industriales, lo que las hace de primera necesidad. Estas actividades tienen características especiales en cuanto a impactos socioambientales directos, distintos a aquellas que se encargan de la producción de bienes de consumo, dado a esto, la LEY debería tratar a las actividades extractivas como prioritarias y con una incorporación obligatoria de modelos de EC, pudiendo así asegurar un mayor aprovechamiento de los recursos y prácticas en la mayor medida posible sostenibles, desde la base de las actividades industriales.

Pese a la falta de presencia de la minería, la LEY presenta los principios de EC, entre los cuales se menciona “preservar el capital natural controlando reservas finitas y equilibrando los flujos de recursos renovables.” (Ley General de Economía Circular, 2021, p.6), por lo que al reconocer a los recursos minerales como reservas finitas es indispensable tomar en cuenta las actividades involucradas en su extracción y manejo. Además, el Estado es el encargado de la administración de los recursos naturales del país, siendo este quien otorga las concesiones mineras, por lo que la implementación de política pública que regule la ejecución de estas actividades debe ser una medida imperativa para lograr mejores prácticas.

Con respecto al impacto de los planes de EC en el ámbito social, el artículo 36 destaca el cómo un plan con un enfoque de EC, puede influir en la sociedad a través de la “Remediación de sitios contaminados... y... la Remediación de sitios no controlados de disposición de residuos” (Ley General de Economía Circular, 2021, p.21) lo que del mismo modo presenta de manera indirecta una oportunidad para esta industria, en la que la remediación de sitios contaminados es indispensable durante el desarrollo y término de sus procesos. Por otro lado, para los pasivos ambientales, sirve como una oportunidad para el aprovechamiento de materiales descartados promoviendo el aprovechamiento de residuos y siendo parte de una remediación, en caso de existir peligros potenciales.

Como conclusión, dicha Ley representa un gran avance para el desarrollo de prácticas más responsables, aprovechamiento de recursos y sobre todo para el impulso del desarrollo sostenible. Sin embargo, los esfuerzos parecen quedarse en actividades que indirectamente interactúan con la minería, como lo son las actividades

secundarias o de conciencia ambiental desde los consumidores. Con esta ley, se establece una línea base para la incorporación de dicho concepto en las cadenas de valor que son desarrolladas en el país y a crear una cultura apoyada en la EC; pero, sobre todo, da cabida el desarrollo de marcos regulatorios sectoriales que permitan la inclusión de actividades fundamentales para el desarrollo económico del país y que son grandes generadoras de residuos, tal como lo es la minería.

Además de la Ley General de Economía Circular, el 28 de febrero del 2023, se aprobó la Ley de Economía Circular de la Ciudad de México, la cual, formula una serie de objetivos dirigidos a las actividades económicas aguas abajo (negocios, procesos de producción y servicios) y hacia la concientización del consumo y el aprovechamiento de los recursos a nivel sociedad. No obstante, también comienza a trazar un panorama en el que se habla del desarrollo de conocimiento en este ámbito y se mencionan palabras clave como la valorización. En el artículo segundo, entre sus objetivos se tienen los siguientes:

VI. Fomentar la vinculación y participación de la sociedad civil organizada y la academia con los sectores público y privado, para realizar la investigación y potenciar la innovación de tecnología e infraestructura relacionada con la producción y consumo responsable, el rediseño, reducción, reúso, reparación, restauración, remanufactura, readaptación, reciclaje y recuperación de productos y subproductos, basadas en la Economía Circular.

VII. Fomentar la revalorización de los productos y materiales para evitar que se conviertan en residuos, y reducir el consumo de agua, energía y recursos naturales (Ley de Economía Circular de la Ciudad de México, 2023, p.2).

El Objetivo número 7 aborda la reducción del consumo de recursos naturales, una cuestión compleja y parcialmente abordada en las grandes ciudades. Las urbes enfrentan un significativo aumento en el consumo y la producción de residuos, brindando una oportunidad importante para la valorización. Sin embargo, esta situación también plantea la cuestión de si la minería, al satisfacer la creciente demanda de producción derivada de los hábitos de consumo, contribuye al problema.

Es evidente que, si los hábitos de consumo no disminuyen, el impacto ambiental persistirá. La función crucial de la minería radica en la necesidad de incrementar la explotación de recursos mediante el desarrollo e implementación de medidas ambientalmente seguras, la reducción de impactos ambientales asociados a las prácticas mineras, y la promoción de proyectos socialmente responsables que fomenten el crecimiento de las comunidades locales.

Aunque efectivamente, la cultura ambiental es un gran paso para la adopción de la EC, es importante hacer conciencia de la relevancia que tiene la explotación de recursos minerales en las cadenas de valor. La Ley de Economía Circular de la Ciudad de México representa un ejemplo y un gran paso para el desarrollo de legislación en materia por medio de las diferentes entidades, siendo estas la que contribuyan con la LEY e implementen la normativa aplicable de acuerdo con sus actividades económicas y contextos locales.

### **La Economía Circular en la minería**

Aunque el concepto de economía circular ha experimentado una notable evolución en diversos sectores, la situación es distinta en la industria minera. A pesar de su vital importancia como la base de la mayoría de las cadenas de producción, la industria minera aún sigue operando bajo un sistema lineal de explotación, transformación y desecho. Esto la mantiene como una industria con una significativa generación de residuos (Lébre et al., 2017).

Diversos autores han estudiado la EC en relación con esta industria. Los autores Gedam et al. (2021) presentan una recopilación de estudios sobre este tema y analizan los retos existentes para la implementación de este tipo de Economía; en los estudios existentes se consideran temas relacionados como la política y regulación, aspectos sociales, económicos, ambientales, operacionales, tecnológicos y geológicos; sin embargo, no existen modelos que contemplen factores técnicos estructurados para el manejo de los residuos, siendo este, el objetivo primordial para implementar la EC. No obstante, para introducir a la minería en la Economía Circular, es necesario adaptar el concepto a cada uno de los procesos que la conforman, y lo más importante, tomar en cuenta que dicha industria ha evolucionado y crecido como consecuencia de la necesidad del aprovechamiento de recursos naturales no

renovables por parte de la sociedad, de la heterogeneidad y especificidad de cada yacimiento, de los factores internos y externos que afectan la cadena de producción, y del impacto socioambiental que generan cada una de sus etapas.

La EC se enfoca en el **empleo de las 3 Rs** (reducir, reusar y reciclar), lo que, en conjunto, permite reducir la generación de residuos y el aprovechamiento máximo de los materiales. Los autores Lébrea y Corder (2015) proponen una pirámide que adapta las 3 Rs al manejo de residuos de este sector, para priorizar la prevención de generación de residuos y se tener una visión hacia una recuperación de material valioso; posteriormente, Lébrea et al. (2016) (FIG. 1) plantean una jerarquización para el manejo de residuos destacando la preeminencia de la prevención y la recuperación de pérdidas minerales. A través del empleo de estas medidas y el control del flujo de materiales, se puede evaluar el aprovechamiento de recursos (Lébrea et al., 2017). Esto, puede contribuir a la disminución en la producción de residuos y por ende en reducir costos de remediación posteriores a las operaciones. Gracias a todos estos estudios se pueden definir a las 3 Rs para la Industria Minera siguiendo la jerarquización propuesta por Lébrea et al. (2016):

**Reducir:** En esta industria, la idea de reducir puede parecer difícil, comprendiendo la ascendente demanda de metales, sin embargo, el reducir, va direccionado a la disminución de la producción de residuos, de pérdidas de metales o de peligrosidad. Esta medida se relaciona con la innovación tecnológica, y para lograrlo, se plantean 3 ejemplos (Lébrea et al., 2016). El primero es mejorar la eficiencia de los métodos de extracción mineral, permitiendo que con la misma entrada de la mena se tenga un mejor aprovechamiento y, por lo tanto, se reduzcan las pérdidas de metales; aunque esta medida no disminuya el volumen de residuo generado, aumenta la optimización del recurso. El segundo es integrar métodos de preconcentración de sulfuros, lo que reduce el riesgo de generación de Drenaje Ácido de Mina y, por lo tanto, disminuye la peligrosidad de los residuos generados; la desulfuración puede ser realizada por flotación o por gravedad como lo presentan los autores Amar et al. (2020). Por último, la identificación de subproductos, el cual, permite adaptar los métodos extractivos para un mejor aprovechamiento del recurso en las etapas próximas.

**Reciclar o Reprocesar:** Esta etapa consiste en la recuperación de metales de nuestro residuo, que por diferentes razones no se había considerado su extracción. Sin embargo, el reprocesamiento, depende del tiempo transcurrido desde la disposición, ya que fenómenos como el Drenaje Ácido de Mina pueden contribuir a la pérdida de concentraciones de metales de interés (Lébre et al., 2016). Este método es el más utilizado y estudiado como **valorización** de los residuos; una clara limitante, es la caracterización cualitativa de los residuos, que, debido a la compleja mineralogía y falta de técnicas de determinación, hacen complicado su total identificación; otra claro reto es la restringida capacidad de los métodos para recuperar elementos que se encuentran en concentraciones muy bajas, lo que hace evidente que el desarrollo de la tecnología es crucial en este camino.

**Reusar:** Al entrar en esta etapa, el residuo es considerado sin metales con concentraciones económicas para su reprocesamiento, por ello, puede ser utilizado para un propósito que genera un valor más bajo (Lébre et al., 2016). En esta propuesta el desecho es destinado a convertirse en materia prima de valor y con un nuevo fin, tal como su uso como material de construcción, creación de techosuelos, entre otros. Las opciones que se tienen en esta segunda forma de valorizar son variadas y dependen de su contenido de diferentes elementos que pueden agregar o restar valor según el propósito.

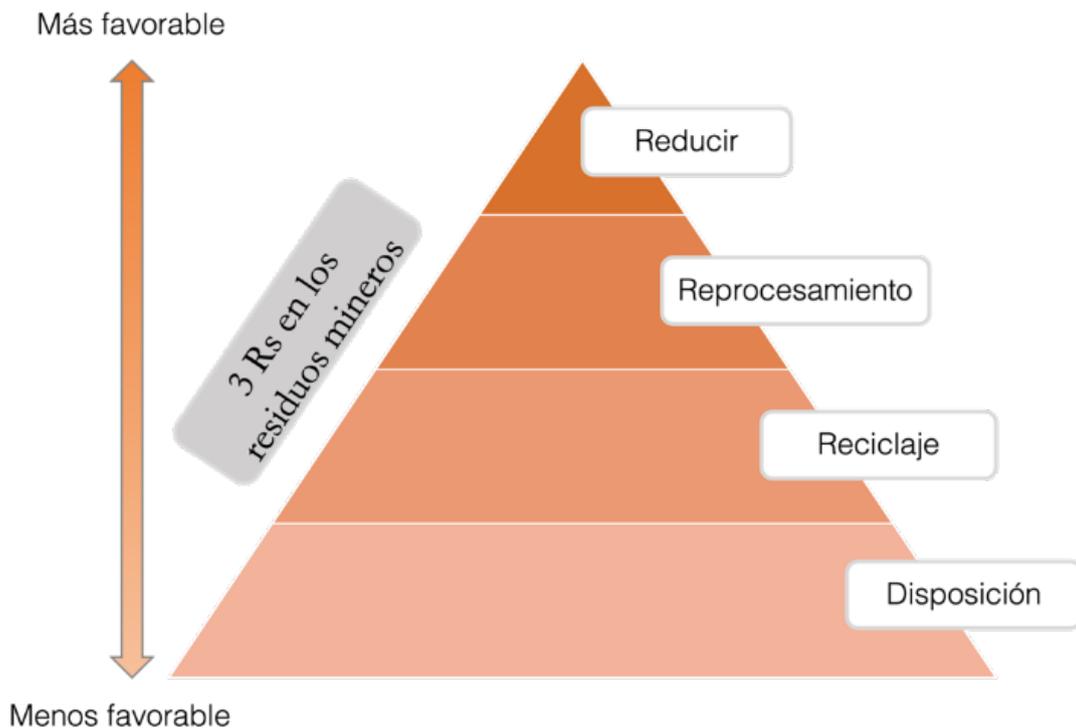


FIG. 1 JERARQUÍA DE MANEJO DE RESIDUOS. ADAPTADO Y MODIFICADO DE LÉBRE ET AL. (2016)

La EC también va en línea con la ascendente preocupación por **disminuir las alteraciones al medio ambiente y afecciones a la salud**. El autor Lottermoser (2011) elabora una jerarquía para la remediación de sitios de mina (FIG. 2) similar a la de manejo de residuos siguiendo las 3Rs. Evitar alteraciones en el ambiente es lo idóneo, sin embargo, al pensar en una actividad de explotación de recursos naturales es imposible de lograrlo; la remediación del suelo y la reintegración a los ecosistemas naturales es un objetivo que tiene que ser ejecutado durante y después de las operaciones, no solo como una planeación de cierre de minas en la que inevitablemente se habla de una remediación ambiental.

Durante las últimas décadas, las actividades mineras han sido foco de estudios orientados a la peligrosidad de sus residuos (Anawar, 2015). Sin embargo, la visión de los desechos, como un material con valor, permite conjuntar ambas ideas (Dino et al., 2018), y así, fomentar nuevas alternativas para su manejo, haciendo énfasis en la importancia de la **caracterización de estos materiales** y de la necesidad de una **metodología estructurada** (Dino et al., 2018), que permitan un mejor entendimiento de los procesos para la toma de decisiones.

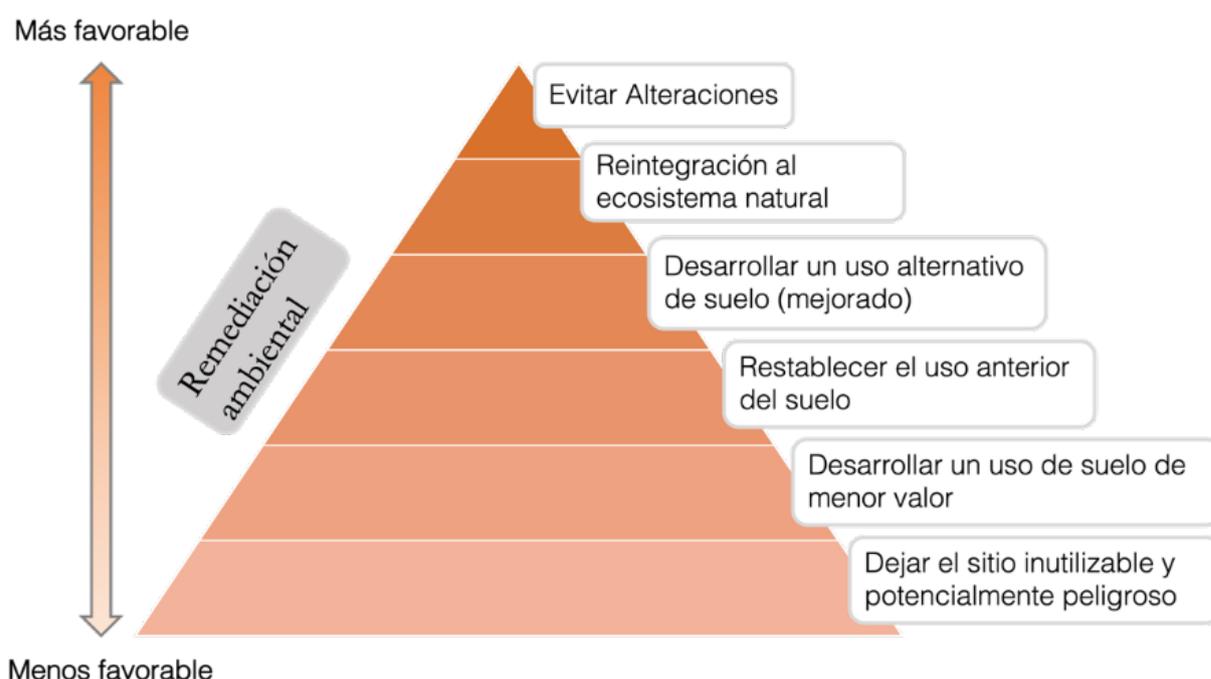


FIG. 2 JERARQUÍA DE REHABILITACIÓN DE SITIOS DE MINA. ADAPTADO Y MODIFICADO DE LOTTERMOSEER (2011).

Diferentes propuestas de modelos de EC han surgido, abarcando diferentes aspectos. Como modelo económico, en el que se le da valor al residuo, se tienen tres alcances: un ciclo interno minero, en donde los productos recuperados regresen a los procesos propios; un ciclo tipo parque industrial minero, en el que los recuperados se aprovechen en otras cadenas industriales; y del alcance social (Zhaoa et al., 2012). Como ejemplo de parque industrial, Kazmierczak et al. (2018) plantean un análisis cualitativo con diferentes criterios económicos y ambientales para conocer el potencial reúso de residuos, a pesar de ello, quedan preguntas, sobre cómo integrar estos materiales, a cadenas de producción que sean sostenibles a futuro (Giurco et al., 2014). Con respecto al potencial de reúso, se pueden analizar las preferencias locales para proponer las alternativas (Kázmierczak et al., 2019), dando así, cabida a la búsqueda del bien común con un alcance local.

A pesar de la gestación y evolución de la EC enfocada a la industria minera, es necesario integrar las diferentes visiones en un ciclo estructurado, que permita un manejo de residuos acorde a los lineamientos ambientales; para así, poder detectar puntos débiles en las regulaciones y en el estado del conocimiento. Aplicar el manejo de residuos enfocado en la optimación de recursos, puede ser un gran paso hacia

una minería sostenible, o, mejor dicho, responsable; cumpliendo la demanda de una sociedad con un consumo ascendente de materiales, sin comprometer las necesidades de futuras generaciones (Zhaoa et al., 2012).

## 1.2 RESIDUOS GENERADOS POR LA INDUSTRIA MINERA

### 1.2.1 ¿QUÉ SON Y CÓMO SE GENERAN?

Los residuos de mina pueden definirse, como los subproductos de cada uno de procesos involucrados en la obtención de materias primas, (FIG. 3) los cuales se clasifican en 3 principales: exploración, explotación y beneficio. Como se aprecia en el diagrama referente a la minería metálica, los materiales producto o residuos, poseen características físicas y químicas asociadas a diversos factores operacionales y naturales (Tabla 1) (Rampacek, 1982; Ley Minera, 1992).

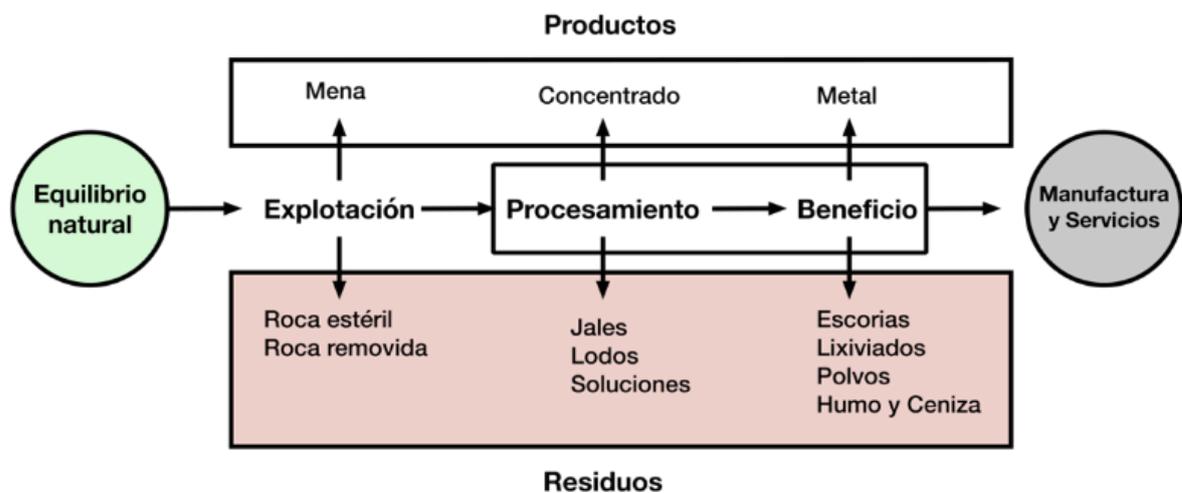


FIG. 3 FLUJO DE PRODUCTOS Y RESIDUOS EN LA MINERÍA METÁLICA. ADAPTADO DE RAMPACEK (1982) Y DE ACUERDO CON LEY MINERA (1992).

Los residuos generados durante las actividades de exploración no son tomadas en cuenta en este estudio, ya que no representan una producción continua de residuos a largo plazo, y, por lo tanto, sus volúmenes son mucho menores.

TABLA 1 PROCESOS Y CARACTERÍSTICAS DE LOS RESIDUOS, EN CADA ETAPA INVOLUCRADA EN LA OBTENCIÓN DE METALES. INFORMACIÓN TOMADA DE LOTTERMOSER (2010).

<b>Etapa</b>	<b>Procesos y características</b>
<b>Explotación</b>	<p>El residuo es producto del minado, por lo que representan las rocas removidas para acceder a la mena. Generalmente no se considera que tiene valores económicos de los metales, sin embargo, esto depende de la ley de corte de la mina. Su composición es dependiente de los procesos geológicos que originaron el yacimiento, por lo que varían en composición, textura y tamaño de grano. Generalmente, son acumulados en el sitio de mina.</p>
<b>Beneficio</b>	<p>Procesamiento: El material desechado en esta etapa es aquel que ha pasado por procesos físicos o químicos agregados para triturar, moler, clasificar y separar la mena de la ganga. Su composición depende en primer lugar, de la geología, por lo tanto, de la geoquímica del yacimiento; del método empleado y su selectividad, de la tecnología utilizada. Normalmente su tamaño de grano es de coloidal a grava y son usados para relleno o son dispuestos saturados de agua en presas.</p>
	<p>Beneficio: El concentrado proveniente del procesamiento o selección previa es la materia prima en la metalurgia extractiva. Principalmente se utiliza la hidrometalurgia, pirometalurgia y la electrometalurgia; agregando solventes, calor electricidad respectivamente, con el objetivo de romper la estructura química de los compuestos para hacer el metal de interés disponible para su recuperación. Además de la naturaleza geoquímica del yacimiento, su composición y características son producto del procedimiento y de los químicos agregados.</p>

---

### 1.2.2 LOS RESIDUOS COMO POTENCIAL PELIGRO O RECURSO

---

Los residuos de esta Industria poseen 3 características que los hacen potencialmente peligrosos (FIG. 4).

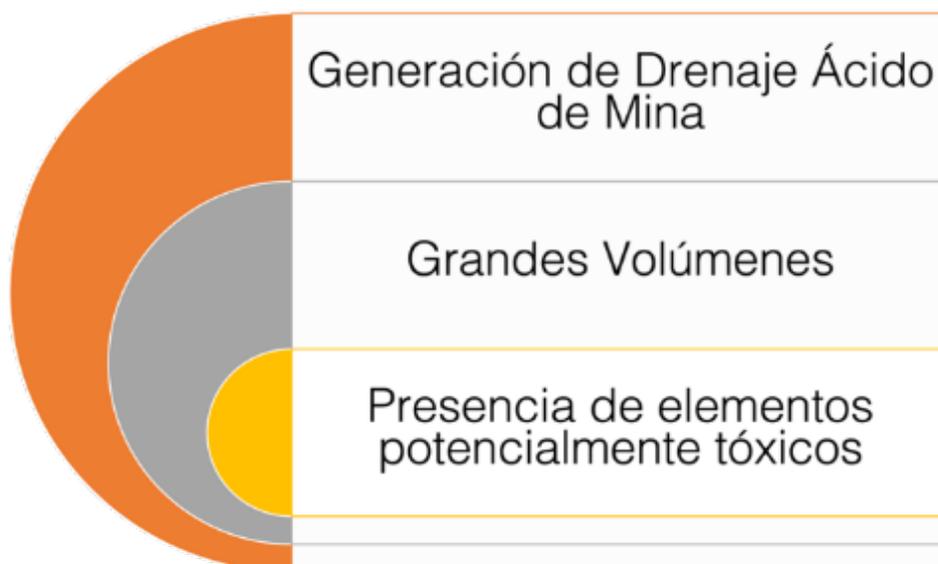
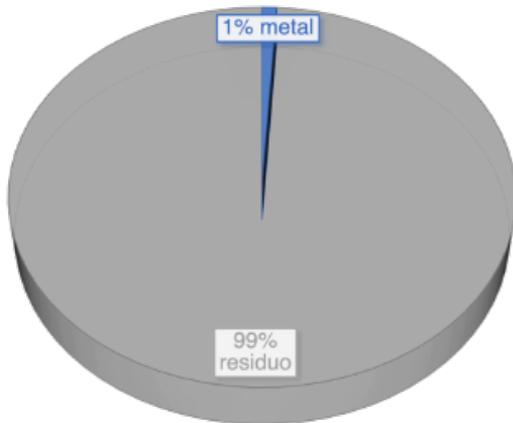


FIG. 4 CARACTERÍSTICAS QUE HACEN A LOS RESIDUOS MINERO-METALÚRGICOS POTENCIALMENTE PELIGROSOS.

En primer lugar, la generación de Drenaje Ácido de Mina (DAM), causada por la oxidación de sulfuros presentes en el residuo; la cual se ve condicionada por la abundancia y distribución de los sulfuros y de los minerales neutralizantes, por el tamaño de partícula, grado de compactación, porosidad, permeabilidad, tipo de roca, por factores del ambiente y los métodos disposición (Azcue, 1999).

En segundo lugar, la presencia de elementos tóxicos, que es producto de los procesos geológicos que dieron lugar a la formación del yacimiento; siendo la mineralogía y el contenido de elementos traza, las que la determinan; por otro lado, su ocurrencia y comportamiento está sujeta a las respuestas físicas y químicas del material al intemperismo y su dispersión en el ambiente (Plumlee G. S., 1999). De forma que, al estar disponibles en el medio, pueden afectar la salud humana (Plumlee y Morman, 2011) y a los ecosistemas.

**1% DEL METAL DE  
INTERÉS ECONÓMICO  
EN UNA ROCA**



**0.1% DEL METAL DE  
INTERÉS ECONÓMICO  
EN UNA ROCA**

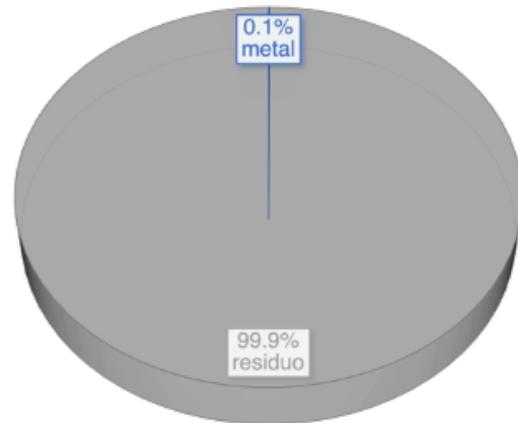


FIG. 5 REPRESENTACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE UN METAL EN UNA ROCA: (IZQ.) CON UNA CONCENTRACIÓN DE 1% Y (DER.) CON UNA CONCENTRACIÓN DEL 0.1%.

Por último, el gran volumen de los residuos de mina es un aspecto inherente de las operaciones, ya que al hablar de concentraciones en pequeños porcentajes (FIG. 5), el material que es descartado durante la separación y selección de la mena representa el mayor volumen de material (Lottermoser, 2010). Al producirse en grandes cantidades, los residuos implican grandes retos en su manejo, control y almacenamiento, significando costos elevados en una disposición controlada y un inminente riesgo si se llegaran a presentar las dos características peligrosas anteriormente mencionadas. La cantidad de residuo sólido producido depende del tipo de yacimiento, de las concentraciones del metal de interés, de los métodos de minado y de la eficiencia de los sistemas de separación y beneficio. El volumen total de residuos generados por la Industria Minera es poco conocido; una aproximación de residuos sólidos es de entre 20,000 y 25,000 Mt en el mundo, sin embargo, a diferencia de la producción de metales, los residuos son poco cifrados (Lottermoser, 2010). Por otra parte, se ha llegado a calcular que el volumen de residuos mineros es 10 veces más que los residuos sólidos urbanos (Boger, 2009), poniendo en manifiesto la notable necesidad de buscar alternativas para reducir el impacto que pueda generar la disposición de cantidades tan elevadas de material.

El concepto residuo para la minería es un poco ambiguo, ya que depende de diversos condicionantes que son independientes entre sí. El límite que separa la mena que es factible extraer y aquella que no, es igualmente difuso (Lébre et al., 2016), ya que es necesario tener en cuenta que más allá de la naturaleza del yacimiento, existen factores económicos, tecnológicos, técnicos y sociales, que intervienen en esta selección. Al comprender que esta línea es móvil, se entiende que el material sólido descartado o incluso un depósito que no haya sido económicamente explotable, puede aún contener concentraciones de metales que puedan extraerse en un futuro, como consecuencia de cambios en los factores anteriormente mencionados.

Darle valor a este material, se le ha llamado valorización o revalorización, haciendo alusión a darle valor a algo que previamente fue descartado. Para evaluar su potencial de valorización, se deben tomar en cuenta diferentes aspectos cualitativos y cuantitativos, en conexión con los procesos necesarios para su aprovechamiento (Dino et al., 2018). Por consiguiente, la cuantificación de residuos y el entendimiento de lo que es un residuo de mina, son el punto de partida en el camino hacia una nueva mentalidad, que considere prioritariamente los residuos como una potencial fuente de metales y compuestos ante la explotación de recursos vírgenes.

Gracias a estas percepciones, se pueden resumir cuatro características que hacen del residuo una atractiva fuente de metales o materiales revalorizables:

1. Los residuos sólidos mineros son de gran volumen.
2. En el residuo quedan concentraciones de metales que con el paso del tiempo pueden ser económicamente explotables.
3. Nuevos elementos cobran interés económico, que anteriormente no eran considerados.
4. Si se recicla o reutiliza el material, puede disminuir el volumen de residuos.

---

### 1.2.3 MINERALOGÍA DE LOS RESIDUOS, SU CARACTERIZACIÓN E IMPORTANCIA

---

“El problema más urgente que tienen los científicos enfocados al reciclaje y al reúso de residuos, es la cuantificación y la distribución de los elementos en estos. Debemos

describir con precisión la química y la mineralogía de los residuos y entender su comportamiento a largo plazo” (Lottermoser, 2011).

### **Mineralogía de los residuos**

La mineralogía de los residuos es variante y depende de diversos factores, como lo son: la naturaleza del yacimiento, la formación de nuevos compuestos durante procesos de beneficio o por la interacción con la atmósfera, hidrósfera y la biósfera, posterior a la disposición. Una caracterización mineralógica de mayor precisión, en conjunto con propiedades físicas, químicas y geoquímicas (Jamieson, 2011), puede representar mejoras en la evaluación de riesgos, planes de minado, una mejor selección de los métodos de beneficio, perfeccionar planes de remediación (Jamieson et al., 2015; Jamieson, 2011), o en este caso, en la determinación del potencial de valorización.

La mineralogía, más allá de la ocurrencia y la concentración de los elementos químicos, determina las estructuras y arreglos en los que se encuentran los elementos químicos, los cuales, dictan las propiedades de los diferentes compuestos y, sobre todo, la relación con los elementos traza. Existen diferentes clasificaciones de los minerales en los residuos de mina. Sin embargo, los autores Jamieson et al. (2015) dividen los minerales o compuestos en 3 categorías:

**Minerales primarios:** Aquellos heredados del yacimiento y que no han sufrido alteración. Entre ellos aparecen los sulfuros (Tabla 2) y otros como carbonatos y silicatos.

**Minerales secundarios:** Generados posterior al minado (Tabla 3). Típicamente, se generan en el sitio alrededor de los minerales por procesos de disolución incongruente o por precipitación generada por las interacciones con los fluidos de mina o de poro (Jamieson et al., 2015). Dependen altamente de la oxidación de los sulfuros primarios (Lottermoser, 2010).

**Compuestos formados por el procesamiento:** Compuestos (no precisamente minerales) generados durante el procesamiento, como, por ejemplo, la oxidación producida durante procesos pirometalúrgicos (Tabla 4).

TABLA 2 EJEMPLOS DE MINERALES PRIMARIOS (SULFUROS), MODIFICADO DE JAMIESON (2011).

Mineral	Fórmula
<b>Pirita</b>	FeS <sub>2</sub>
<b>Marcasita</b>	FeS <sub>2</sub>
<b>Pirrotita</b>	Fe <sub>(1-x)</sub> S
<b>Calcopirita</b>	CuFeS <sub>2</sub>
<b>Bornita</b>	Cu <sub>5</sub> FeS <sub>4</sub>
<b>Esfalerita</b>	(Zn,Fe)S
<b>Pentlandita</b>	(Fe,Ni) <sub>9</sub> S <sub>8</sub>
<b>Enargita</b>	Cu <sub>3</sub> AsS <sub>4</sub>
<b>Galena</b>	PbS
<b>Molibdenita</b>	MoS <sub>2</sub>
	(Cu,Fe) <sub>12</sub> Sb <sub>4</sub> S <sub>13</sub> -
<b>Tetraedrita</b>	(Cu,Fe) <sub>12</sub> As <sub>4</sub> S <sub>13</sub>
<b>Cinabrio</b>	HgS
<b>Cobaltita</b>	CoAsS
<b>Stibnita</b>	Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>
<b>Rejalgar</b>	AsS
<b>Orpimente</b>	As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>

TABLA 3 EJEMPLOS DE MINERALES SECUNDARIOS, MODIFICADO DE JAMIESON (2011).

Mineral	Fórmula
<b>Oxidróxidos de hierro</b>	
<b>Goetita</b>	α-FeO(OH)
<b>Lepidocrocita</b>	γ-FeO(OH)
<b>Ferrihidrita</b>	Fe(OH) <sub>3</sub>
<b>Oxidróxidos de aluminio</b>	
<b>Gibbsita</b>	Al(OH) <sub>3</sub>
<b>Böhmita</b>	AlO(OH)
<b>Minerales de sulfato</b>	
<b>Yeso</b>	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O
<b>Minerales del grupo de la jarosita</b>	(K,Na,H <sub>3</sub> O)Fe <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>
<b>Schwertmannita</b>	Fe <sub>16</sub> O <sub>16</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·nH <sub>2</sub> O
<b>Melanterita</b>	FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O
<b>Copiapita</b>	Fe <sup>II</sup> Fe <sup>IV</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> (OH) <sub>2</sub> ·20H <sub>2</sub> O
<b>Epsomita</b>	MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O
<b>Anglesita</b>	PbSO <sub>4</sub>

TABLA 4 COMPUESTOS FORMADOS POR EL PROCESAMIENTO, TOMADO DE JAMIESON ET AL. (2015).

Compuesto	Origen
<b>Escorodita, <math>\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}</math></b>	Oxidación a presión de mineral de oro, tratamiento de efluentes ricos en Fe y As
<b>Subhidrato de arseniato férrico, <math>\text{FeAsO}_4 \cdot 0.75\text{H}_2\text{O}</math></b>	Oxidación a presión de mena de oro
<b>Sulfato básico de arseniato férrico, <math>\text{Fe}[(\text{AsO}_4)_{1-x}(\text{SO}_4)_x(\text{OH})_x] \cdot w\text{H}_2\text{O}</math></b>	Oxidación a presión de mena de oro
<b>Trióxido de arsénico, <math>\text{As}_2\text{O}_3</math> (ej. arsenolita sintética)</b>	Tostación de mineral de oro rico en As
<b>Maghemita, <math>\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3</math></b>	Tostación u otro tipo de oxidación del mineral de oro sulfurado
<b>Hematita, <math>\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3</math></b>	Procesamiento pirometalúrgico de minerales sulfurados de Fe, precipitación para el control del Fe en el proceso metalúrgico.
<b>Oxi hidróxidos de Fe (e.g. ferrihidrita (<math>\text{Fe}_5\text{HO}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}</math>), goetita (<math>\alpha\text{-FeOOH}</math>))</b>	Precipitación para el control del Fe en residuos de procesos metalúrgicos y de tratamiento de aguas
<b>Minerales del grupo de la jarosita, <math>(\text{K}, \text{Na}, \text{H}_3\text{O}, \text{NH}_4)\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6</math></b>	Precipitación para el control del Fe en el proceso metalúrgico
<b>S Elemental</b>	Oxidación a presión de minerales sulfurosos
<b>Yeso, <math>\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}</math></b>	Precipitación a partir de aguas y residuos ácidos neutralizados con cal
<b>Escorias, incluido el vidrio sintético, los óxidos metálicos, los silicatos y los metales nativos</b>	Procesamiento pirometalúrgico

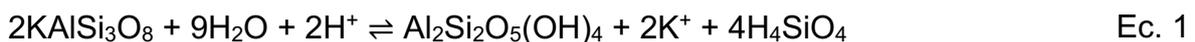
## Movimiento de los metales en el residuo

Como se ha mencionado, al ser dispuestos en el entorno, los residuos experimentan procesos y alteraciones inducidos por la interacción con el agua y el aire. Esta introducción de materiales también modifica los suelos naturales del lugar, generando antroposuelos, que son suelos no naturales afectados por la incorporación de elementos que alteran su composición y características originales (Meuser, 2010). Por lo tanto, aunque estos suelos son creados por la actividad humana, los procesos mediante los cuales los elementos y compuestos circulan se consideran propios de los suelos desde el momento en que se disponen los residuos, especialmente cuando son residuos históricos que llevan mucho tiempo en el ambiente.

Por esta razón, la solubilidad de los minerales presentes en el nuevo material, en condiciones superficiales de intemperismo, es un factor clave para comprender el comportamiento y la movilidad de los elementos. Las condiciones geoquímicas dictan las reacciones químicas posibles y los productos minerales estables en esas circunstancias. La disolución incongruente de minerales formadores de roca puede dar lugar a la formación de arcillas, zeolitas u óxidos e hidróxidos insolubles (Faure, 1998), los cuales juegan un rol importante para la retención de especies químicas presentes en la solución del suelo.

Algunas reacciones que tienen lugar en los minerales formadores de roca en condiciones superficiales (a 1 atm de presión y a 25 °C), junto con sus constantes de equilibrio ( $\log k$ ) según el autor (Faure, 1998) o calculadas utilizando la energía libre de formación obtenida de la literatura especializada por el autor (Romero, 2004) se presentan en las ecuaciones Ec.1 a Ec.7.

(microclina a caolinita)



$$\log k = -5.21$$

(caolinita a gibbsita)



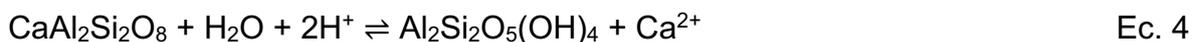
$$\log k = -9.35$$

(microclina a moscovita)



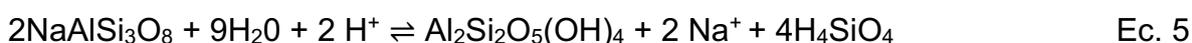
$$\log k = -11.865$$

(anortita a caolinita)



$$\log k = +16.2$$

(albita a caolinita)



$$\text{Log } k = +10.2$$

(moscovita a caolinita)



$$\log k = +8.11$$

(solubilidad de silica amorfa)



$$\log k = -2.64$$

Además, en el contexto de yacimientos minerales metálicos, la oxidación de los sulfuros desempeña un papel crucial en la química de los residuos. La oxidación de estos sulfuros da lugar a nuevas especies minerales, que suelen ser poco cristalinas y poco solubles. Este proceso puede generar acidez y formar sulfatos con los elementos presentes. Algunas de las reacciones presentadas por los autores (Faure, 1998; Romero, 2004) que ocurren se muestran en las ecuaciones Ec.8 a Ec.13.

Oxidación de la pirita



$$\log k = +221.1$$

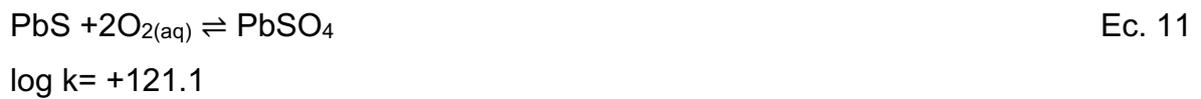
Disolución de la calcopirita



Disolución de la esfalerita



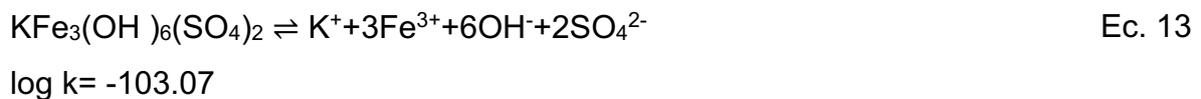
Disolución de la galena



Solubilidad de hidróxido de Fe



Disolución de la jarosita



Otro mecanismo que influye en la movilidad de los elementos en forma iónica es la sorción en la superficie de los sólidos. En términos generales, los principales mecanismos de sorción son la adsorción, el intercambio catiónico y la precipitación (Strawn, 2021). La sorción está dominada por la interacción entre los sólidos y las especies en solución; en el caso de los residuos de mina, aquellos minerales primarios, secundarios o formados por el beneficio, serán aquellos que podrán retener por medio de estos mecanismos a las especies químicas que se encuentren en el medio.

Las características del sólido que lo hacen atractivo para llevar a cabo una sorción son: el área de superficie específica, cargas electrostáticas o el contar con grupos funcionales reactivos en sus superficies (Strawn, 2021). Por ello, minerales como las arcillas, óxidos de Fe y Al y la materia orgánica son el foco de estudio de estos

procesos. El autor (Strawn, 2021) presenta diferentes tipos de superficies que permiten la adsorción los cuales son los siguientes:

1. Carga negativa permanente de las arcillas: Esta es creada por la sustitución isomórfica en minerales de arcilla.
2. Ligandos hidroxilos en las superficies de los minerales: Enlaces insatisfechos que ganan o pierden protones, es dependiente del pH. Común en óxidos de aluminio y hierro, y en algunas arcillas como la caolinita.
3. Por grupos funcionales débiles presentes en la materia Orgánica.
4. Regiones hidrofóbicas en la materia orgánica.

En el caso de las arcillas, la sorción, puede deberse a los dos mecanismos posibles: en primer lugar, aquella que se presenta entre las capas de la arcilla a causa de la carga negativa permanente que presentan este tipo de minerales, siendo independiente del pH; en segundo lugar, la sorción en la superficie, la cual es dependiente del pH (Kraepiel et al., 1999).

Además de las arcillas, las superficies de sólidos como los óxidos de Fe, hidróxidos de Fe y Al, carbonatos, el  $\text{SiO}_2$ , entre otros, han sido estudiados por su capacidad de retener aniones y cationes en su superficie, la cual, puede adquirir una carga que depende del pH del medio. Para poder entender su comportamiento se ha definido el concepto de Punto de Carga Zero (PCZ) el cual indica los valores de pH en los que la carga de una superficie es equivalente a cero (Sposito, 1998), por lo tanto, se considera que por debajo o encima de este punto, la superficie puede tener una carga electronegativa que favorezca la sorción.

### **Caracterización mineralógica de los residuos**

Existen diferentes técnicas comúnmente empleadas para la determinación mineralógica (Tabla 5), la selección de qué método utilizar depende ampliamente de las características del material, del objetivo de la caracterización y de las técnicas que se tengan disponibles con relación al costo-beneficio. No obstante, la caracterización mineralógica en este tipo de materiales continúa siendo un reto, como consecuencia de la presencia de compuestos poco cristalinos, de las concentraciones relativamente

bajas de algunos elementos de interés, las micro y nano escalas (Jamieson, 2011), y de la necesidad de métodos o combinación de métodos (Jamieson et al., 2015) que permitan realizar identificación de minerales y compuestos con estas condiciones.

TABLA 5 TÉCNICAS ANALÍTICAS EMPLEADAS PARA LA CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE RESIDUOS DE MINERO-METALÚRGICOS. ADAPTADO Y MODIFICADO DE JAMIESON (2011).

Técnicas analíticas	Aplicación a la mineralogía de residuos de mina
<b>Microscopio minerográfico</b>	Relación textural, identificación de minerales metálicos
<b>Microscopía electrónica de barrido, Scanning Electron Microscopy (SEM)</b>	Imágenes, mapeos elementales y análisis químicos puntuales cualitativos
<b>Análisis con microsonda electrónica, Electron Microprobe Analysis (EMPA)</b>	Mapeos elementales, análisis químicos puntuales cualitativos
<b>Transmission Electron Microscopy (TEM), Scanning Transmission Electron Microscopy (STEM)</b>	Imágenes de alta resolución, puede incluir información química y difracción de electrones
<b>Difracción de rayos X, X-ray diffraction (XRD), including Rietveld analysis</b>	Identificación mineral basado en estructura cristalina; el análisis Rietveld proporciona cantidades relativas de fases cristalinas en mezclas
<b>Difracción de micro-rayos X con fuentes convencionales o de sincrotrón, Micro-X-ray diffraction using conventional or synchrotron sources (micro-XRD)</b>	Identificación mineral a escala de grano en la estructura cristalina; aplica a materiales poco cristalinos
<b>Espectroscopía de absorción de rayos X basada en sincrotrón, Synchrotron-based X-ray absorption spectroscopy (XAS)</b>	Caracterización mineral basada en el estado de oxidación y estructura de corto alcance
<b>Fluorescencia de rayos X basada en sincrotrón, Synchrotron-based X-ray fluorescence (micro-XRF)</b>	Mapeo elemental y análisis puntuales semi cuantitativos
<b>Extracciones secuenciales y pruebas de lixiviación (indirecta)</b>	Fracciones extraídos de elementos asociados con minerales

## **Pero ¿Qué tan importante es llevar a cabo una buena caracterización mineralógica para tener una visión económica potencial del residuo?**

El entendimiento de la mineralogía ha evolucionado conforme a la selección y procesamiento, ya que, en los procesos modernos; la caracterización de la mena, los productos secundarios y el residuo, es vital para reducir las pérdidas de los metales de interés (Jamieson et al., 2015), esta misma idea puede ser escalada a los residuos, ya que un buen entendimiento puede conducir a un reciclaje o reuso.

Para ejemplificar cómo es que la caracterización cualitativa es un paso clave para una visión económica de los materiales, ya sean provenientes de depósitos o desechos, se tienen algunos casos en los que la mineralogía ha sido el elemento decisivo en la gestación de una visión económica de los recursos naturales:

### La extracción del litio

El litio (Li), este metal alcalino de baja densidad electroquímicamente activo, el cual tiene un altísimo valor potencial redox y la mayor capacidad calorífica específica, características que lo convierten en una deseada materia prima para la vida moderna (Swain, 2017). Este metal tiene muchos usos, como lo son las cerámicas, catalizadores, aleaciones, farmacia, uso médico, baterías, entre otros (Talens Peiró et al., 2013), no obstante, en la actualidad, el uso en baterías para autos eléctricos es considerado indispensable para el desarrollo de economías con una reducción de emisiones de carbono (Kavanagh et al., 2018), lo que ha llevado a diversas naciones a identificar a este metal como componente estratégico para su desarrollo económico (Government of Canada, 2022).

La ocurrencia geológica de este codiciado metal se centra en tres tipos de depósitos: 1) Depósitos de pegmatita y rocas metasomáticas asociadas, siendo estos los que tienen los grados más altos de Li de hasta 1.1 wt%, 2) Depósitos de arcillas volcánicas, con grados de Li intermedios de entre 0.17 a 0.22 wt% y 3) Depósitos tipo salmueras, las cuales muestran los grados más bajos, de entre 0.012 a 0.117 wt%. Aunque, otra de sus fuentes puede ser en depósitos de manganeso (Bowell et al., 2020). Se han reconocido 124 especies minerales de Li, de las cuales 73% son

silicatos, 19% fosfatos y 8% carbonatos, fluoruro, óxidos e hidróxidos, boratos o arseniatos (Grew, 2020).

Dado a sus altas concentraciones, puede pensarse, que el Li en pegmatitas es la opción preferible para su explotación, seguida por las arcillas y en último lugar las salmueras. Sin embargo, para obtener este preciado metal, las especies minerales o químicas, determinan la elección de métodos de separación y beneficio, sin olvidar, que es necesario separar al Li de las fases presentes y convertido en carbonato de litio o hidróxido de litio (Bowell et al., 2020) y ser utilizado en los diferentes procesos industriales.

La producción actual de Li de acuerdo con los tres tipos de depósitos (Zhao et al., 2023), sin embargo, debido a la creciente demanda y el alza de los precios, se ha intensificado la búsqueda de fuentes para su obtención (Martin et al., 2017); algunos ejemplos de estas fuentes son las arcillas, anteriormente consideradas no económicas (Martin et al., 2016), el agua de mar (He et al., 2020) y por el reciclaje de baterías (Bae y Kim, 2021).

La selección de los métodos de minado y procesamiento se basan en el tipo de depósito y, por ende, en su mineralogía. En el caso de las pegmatitas, la mena principal del Li es la espodumena  $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$ , a pesar de que se pueda encontrar en otros minerales; para su recuperación, la técnica de beneficio más usada es la flotación, seguida por la extracción por pirometalurgia, hidrometalurgia o una combinación de las anteriores (Kundu et al., 2023). En depósitos de salmuera, considerables cantidades de Li se encuentra como ion  $\text{Li}^+$ , por lo que el minado es de bajo costo, puesto que, se basa en el bombeo de agua de los acuíferos, se emplea la evaporación de la cual se obtiene un concentrado que posteriormente es purificado (Tabelin et al., 2021), pese a que otros métodos más sofisticados se han empleado para mejorar la recuperación. Por último, los minerales arcillosos portadores de Li más comunes son: la lepidolita (polilitionita, trilitionita), la zinnwaldita, la masutomilita, la swinefordita, la hectorita, la cookeita y la jadarita; los cuales tienen generalmente una estructura 2:1, en el que el Li puede entrar en el espacio de intracapa y fijarse por mineralización o isomorfismo (Zhao et al., 2023); para su beneficio, se han empleado

los siguientes métodos de extracción: acidificación, tostado de sal y alcalinización; no obstante, la acidificación con una recuperación por precipitación, parece ser el método más adecuado gracias a su alta eficiencia, por encima del 90%, costos más bajos, mayor protección ambiental, mayor resistencia a la corrosión y garantía de seguridad del equipo de extracción; sin embargo la separación y purificación son complicadas, junto con residuos que necesitan ser tratados adecuadamente. La recuperación de Li en arcillas parece prometedora, siempre y cuando se tenga una buena eficiencia, ya que el contenido de Li es bajo; a futuro, una combinación de métodos puede mejorar la selectividad en el proceso, resultando en una recuperación más eficiente (Zhao et al., 2023).

Las arcillas son minerales complejos, ya que en la naturaleza se encuentran interestratificados y mezclados con otras arcillas de diferente composición; adicionalmente, las propiedades físicas de las arcillas se ven afectadas por los otros minerales presentes y haciendo de estos materiales un desafío en cuanto a su identificación y separación (Valaskova, 2012). Su capacidad de adsorción, grande área superficial, capacidad de expansión, dispersión y sus cargas negativas le dan la capacidad de adsorción e intercambio iónico. Gracias a esto las características de cada mineral de arcilla con Li tienen sus especificidades, como lo es la posición del metal en el mineral (Zhao et al., 2023).

En el caso de México, el Li se convirtió en uno de los temas más polémicos de los últimos años. Llevando a noticias que aseguraban que se había descubierto el mayor yacimiento de Li en el estado de Sonora (Hernández, 2020), resultando en expectativas de un crecimiento económico derivado de este metal al ser declarado de utilidad pública en las modificaciones a la Ley Minera (Ley Minera, 1992), realizadas el 20 de abril del 2022. Actualmente, la exploración de Li en el país se lleva a cabo en los estados de Baja California, San Luis Potosí, Zacatecas y Sonora. Este último desarrollado por Bacanora Minerals con el proyecto de litio de Sonora. El proyecto se ubica en el municipio de Bacadéhuachi con una ley de 0.30% de litio (Dirección General de Desarrollo Minero, 2018).

El reporte técnico de Bacanora Minerals Ltd (BM) del 2018 indica que la mineralización se encuentra en series de arcillas con Li separadas por horizontes de ignimbritas. Las técnicas empleadas para la caracterización mineralógica fueron Difracción de rayos X, análisis químicos con Microscopio Electrónico de Barrido y Análisis con Microsonda Electrónica; los resultados de la caracterización en conjunto con los resultados químicos muestran que los minerales presentes son: calcita, cuarzo, feldespatos y montmorillonita, con cantidades traza de ilita, micas y plagioclasa. Las micas son presentadas como mezclas de esmectitas e ilitas, intercrecidas con cuarzo y feldespato y calcita; además, se menciona que la polilitonita y la hectorita pueden estar presentes. Con los resultados mineralógicos se procedió a las pruebas metalúrgicas en donde se lleva a cabo una molienda, separación de fracciones gruesas, seguido por tostación, hidrometalurgia y precipitación para su recuperación (Ausenco Services Pty Ltd, 2018).

Es evidente reconocer que la caracterización mineralógica realizada por BM, logró definir la fase mineral en la que se encuentra el Li, pero no se determinó la posición del metal en la estructura del mineral, lo cual, repercute en incertidumbre para la selección de métodos de beneficio y procesamiento, impactando la toma de decisiones para encontrar la combinación de métodos que permitan altas recuperaciones del metal. La metalurgia busca extraer el elemento de interés empleando métodos que permitan romper, liberar, concentrar y recuperar los elementos, por ende, la selección debe de ser realizada comprendiendo el compuesto al que se encuentre asociado dicho elemento y si posición en él, ya que no todas las técnicas podrían conducir a los mismos resultados.

Reconociendo que la recuperación de Li en arcillas es una alternativa atractiva a futuro, deja abierta la posibilidad de que los depósitos de este tipo sean un potencial económico; además, dejan en claro la pertinente necesidad de coordinar esfuerzos en el entendimiento de los minerales de arcilla y los métodos que se adapten a las especificidades de estos materiales.

### Formas y portadores de oro

Otro ejemplo claro de la notable contribución de la mineralogía en el beneficio de los elementos es el oro (Au). El Au es considerado un metal noble con una baja ocurrencia en la Tierra. A diferencia del Li, el Au se encuentra en nueve principales depósitos, los cuales son: pórfidos auríferos y relacionados con rocas ígneas, carbonatitas y cuerpos relacionados a ellas, tipo skarn, vetas, stockworks y estructuras mineralizadas Au-Ag en terrenos volcánicos, estructuras en terrenos sedimentarios, ígneos intrusivos y rocas graníticas, stockwork diseminados en diferentes tipos de rocas, conglomerados de rodados de cuarzo y cuarzitas y depósitos de placer; además, puede encontrarse como subproducto en depósitos de otros metales (Boyle, 1987).

La mineralogía predominante es el Au nativo y por aleaciones con Ag y elementos del grupo de platino, seguido por telurios; los minerales de Au se caracterizan por alta dureza, brillo y alto peso específico. Además de los minerales mencionados, este metal puede estar presente como Au en solución sólida, en partículas tamaño coloidal y Au superficial (Adams, 2005).

El Au en solución sólida se encuentra distribuido en la estructura cristalina de sulfuros en las capas de crecimiento de los cristales o en el caso menos común dentro de pequeñas facturas cicatrizadas. El Au, tiene preferencia por la arsenopirita ya que existe una fuerte correlación entre ambos y por sulfuros de grano muy fino ( $<20 \mu\text{m}$ ). A pesar de ello, la pirita es el sulfuro más abundante y en algunos casos es el mineral de mena del Au más importante (Adams, 2005); un ejemplo claro de este tipo de Au son los depósitos tipo Carlin (Hofstra y Cline, 2000). Por otro lado, el Au coloidal se muestra como inclusiones de entre 5 a 500nm en sulfuros por medio de exsolución o nucleación, también se ha observado alrededor de minerales de arcillas y en la tostación de la pirita formado por coagulación. Por último, el Au superficial, es el resultado de la sorción, precipitación o intercambio iónico de este metal en la superficie de las partículas por soluciones portadoras de Au (Adams, 2005).

Como se puede observar, el Au puede estar presente en una variedad de depósitos y manifestarse de diversas maneras. Las formas en las que se presenta el oro hacen

referencia a su estado químico, que puede ser cualquiera de los tres mencionados anteriormente. El término portador se refiere a las partículas que contienen más de una de estas formas; este fenómeno tiene un impacto directo en las respuestas de flotación, lo que se traduce directamente en la recuperación del metal (Adams, 2005). De la misma forma, la especie mineral o química define las características y permiten una selección certera de los métodos necesarios para su recuperación; el desconocimiento de las partículas o minerales portadores puede repercutir en pérdidas del metal y, por lo tanto, en pérdidas económicas.

Con estos ejemplos, queda en claro la trascendencia del papel de la minería y más en específico de buenas prácticas en la caracterización y conocimiento de los depósitos y sus ocurrencias minerales. Especulaciones poco aterrizadas que llevan hasta la toma de decisiones de gobiernos e inversionistas hasta pérdidas de metales durante los procesos de beneficio, apuntan al mismo sitio, al total entendimiento de nuestros recursos naturales, siendo la mineralogía la respuesta al cómo se encuentran, más allá de cuánto se tiene.

### 1.3 REGULACIÓN Y MANEJO DE RESIDUOS EN MÉXICO

---

La legislación ambiental en México tiene como base regitiva la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) promulgada en 1988 (SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018) que busca “la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente, en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción” (Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, 1988). Enfocado a los residuos, se tiene la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) que tiene como finalidad la prevención de la generación, valorización y gestión de los diferentes tipos de residuos para evitar la contaminación y proceder a la remediación (Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, 2021).

Algunos residuos mineros-metalúrgicos pueden presentar características peligrosas y para su caracterización y manejo se cuenta con normativas específicas para cada tipo; por otro lado, un número de residuos metalúrgicos son generalmente considerados como Residuos Peligrosos (RP) ya sea por los listados que se encuentran en la NOM-052-SEMARNAT-2005 (SEMARNAT, 2006) o por sus características.

La Norma Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009 (SEMARNAT, 2011) establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros, esta norma, tiene como objetivo minimizar la generación de residuos y maximizar su valorización bajo criterios de eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social. En cuanto al manejo de residuos, enlista procedimientos para llevar a cabo su manejo (FIG. 6), entre los cuales son las siguientes: reducción de la fuente, separación, valorización, tratamiento, almacenamiento y disposición final. Diferentes normas referentes a confinamiento, caracterización de jales, concentraciones de concentración de suelos contaminados, etc. se encuentran referenciadas en esta norma.

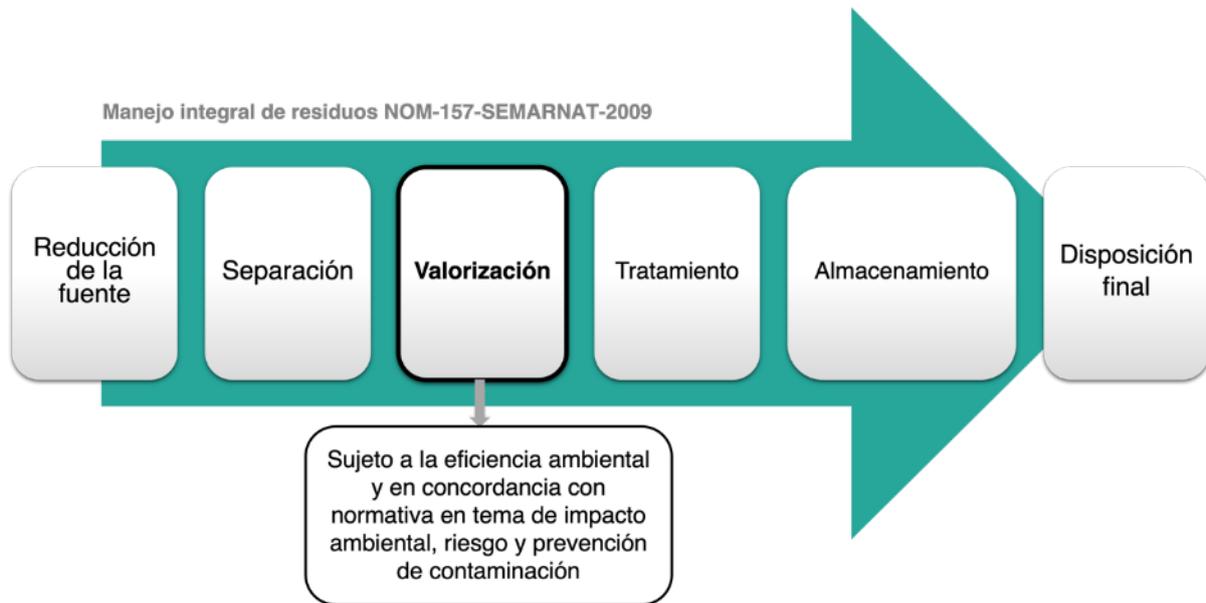


FIG. 6 OPCIONES PARA EL MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS. INFORMACIÓN TOMADA Y ADAPTADA DE LA NOM-157-SEMARNAT-2009

Más allá de los marcos regulatorios, los residuos mineros son un campo poco explorado, ya que métodos recomendados o normados, en ocasiones no toman en cuenta la especificidad de cada residuo, además de la brecha de conocimiento que existe entre el entendimiento del comportamiento a futuro de estos materiales dado por la heterogeneidad del mismo, de los sistemas reales que difícilmente pueden reproducirse de una manera generalizada y de las fracciones de partículas más pequeñas o poco cristalinas que limitan su análisis cualitativo.

## 1.4 VALORIZACIÓN DE RESIDUOS MINEROS

---

### 1.4.1 ANTECEDENTES

---

Valorización es una palabra que frecuentemente es interpretada como recuperación, reuso o reprocesamiento. A pesar de ello, cualquiera de estas no representa la totalidad del campo que abarca. **Valorización** es el acto de afirmar que algo existente es valioso o útil, debido a esto, el valor obtenido puede ser por medio de cualquiera de las 3 acciones mencionadas, dándole un significado más completo. Para esta investigación la valorización será considerada como el reuso o reciclaje, para seguir la idea de las 3Rs.

La idea de reciclaje de residuos mineros no es nueva, desde la Edad del Bronce se tienen registros de intentos de recuperación de metales (Lottermoser, 2011). En los años ochenta, se plantea el reprocesamiento como fuente de metales (Rampacek, 1982); posteriormente, más estudios comienzan desarrollarse tomando diferentes enfoques, desde económicos hasta metalúrgicos (Ayres, 1997; Falagán et al., 2017), (Ceniceros-Gómez et al., 2018; Alcalde et al., 2018; Araya et al., 2020) para la recuperación de diferentes metales, incluyendo tierras raras; siendo este la opción de valorización más estudiada y practicada.

Durante los tiempos de los Romanos, se reutilizaban escorias para caminos (Lottermoser, 2011), siendo estos los primeros registros de reuso de residuos de actividades minero-metalúrgicas. Hoy en día se han explorado diversas aplicaciones que podrían tener estos materiales como lo son: uso de escorias para la construcción de caminos (Lottermoser, 2010), materiales de construcción, cementos (Martins et al., 2021; Simonsen et al., 2020); elaboración de ladrillos (Ahmari y Zhang, 2012), como fertilizantes (Bakken et al., 1998), como relleno en minas subterráneas (Bian et al., 2012), tecnosuelos, entre otros.

Ahora bien, más allá de las posibles aplicaciones, aún existen retos y obstáculos, que son necesarios abordar, de modo que la valorización sea vista por la Industria Minera como una alternativa atractiva para el manejo de sus residuos. Los desafíos para su implementación se pueden resumir en los siguientes: tecnológicos, ambientales, económicos, necesidad de crear nuevas cadenas de valor, desarrollo de métodos

predictivos y analíticos, generación de conocimiento para caracterizar los residuos (Kinnunen y Kaksonen, 2019) y (Bian et al., 2012). El área que necesita ser desarrollada en primera instancia, es la cuantificación y caracterización de los residuos, de forma que el entendimiento de la naturaleza química y mineralógica será el eslabón clave para la evolución de este concepto (Lottermoser, 2011). Con el desarrollo de esta, las demás áreas podrían contemplar escenarios más reales y predictivos, ayudando a poner a la valorización de residuos como una actividad aplicable en un manejo integral de residuos, reduciendo el volumen de material que de desechados y, en consecuencia, disminuyendo las afecciones al medio ambiente y a la salud humana.

---

#### 1.4.2 LA VALORIZACIÓN DE RESIDUOS Y LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS) DE LA ONU

---

Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Sostenible fueron creados a lo largo de décadas por diferentes países y las Naciones Unidas con el fin de lograr paz y prosperidad para la gente y el planeta; al mismo tiempo que luchamos en contra del calentamiento global y preservamos nuestros recursos naturales (United Nations, 2021).

La Geología y de manera general, las Geociencias, se han visto poco relacionadas con los ODS ya que éstas, abarcan diferentes temas y pareciera no conectar directamente con estas ciencias, sin embargo, el conocimiento de los procesos terrestres tiene una gran cantidad de campos de aplicación, jugando un papel crucial en temas relacionados con recursos naturales, riesgos, y contaminación; por lo tanto, es necesario comenzar a conectar nuestro conocimiento científico y nuestras habilidades con estas iniciativas. La valorización de residuos de mina se encuentra en sintonía con el objetivo 11 y el 12 (Kinnunen y Kaksonen, 2019), las cuales se centran en el consumo, producción y asentamientos humanos sostenibles (FIG. 7).

Identificar como es que cada investigación empata con los objetivos globales que buscan proporcionar bienestar, mientras se desarrollan prácticas responsables y justas para las personas y el medio ambiente, es necesario, para destacar la relevancia que tiene la ciencia y la necesidad de conectar con otras áreas de conocimiento; el trabajo multidisciplinario es decisivo para el futuro.



FIG. 7 OBJETIVOS DEL DESARROLLO SOSTENIBLE QUE VAN DE ACUERDO CON LA VALORIZACIÓN.

## 1.5 ELEMENTOS CRÍTICOS

### 1.5.1 ¿QUÉ SON Y CÓMO SE DEFINEN?

La tecnología avanza y con ella, la necesidad de emplear nuevos materiales que permitan llevar a cabo las transiciones que el siglo XXI demanda. Los materiales utilizados a lo largo de la historia han sido de acuerdo con las necesidades de cada tiempo; sin embargo, en la actualidad, la lista de elementos que permiten el crecimiento de las industrias adaptadas a un marco responsable con el medio ambiente ha crecido; nuevos elementos que en el pasado no tenían ningún interés económico han entrado al selecto grupo que son el blanco de la Industria de la explotación de recursos naturales. Por otro lado, existen factores que elevan la preocupación por su disponibilidad haciéndolos inseguros; la escasez geológica, costos y limitantes en la extracción, la dependencia del suministro a cargo de países políticamente volátiles y por la condicionante de elementos como subproductos (Eggert, 2011).

Para su análisis, se plantean algunos términos que acotan los minerales o materiales de acuerdo con su importancia en el desarrollo de la industrial o de seguridad de un país. El Servicio Geológico de los Estados Unidos de América (USGS, por sus siglas en inglés) (Schulz et al., 2017) define los términos: minerales estratégicos y críticos.

La idea de **Minerales Estratégicos** (ME) surge en la Primera Guerra Mundial, ya que se consideraron como aquellas materias primas que no podían ser producidas en suficiente cantidad por fuentes domésticas y eran necesarias para fines bélicos. Sin embargo, a los ME los definiremos como aquellos materiales cruciales para el desarrollo industrial, energético y de defensa nacional; además, consideraremos a aquellos minerales que son producidos en el país y son considerados como críticos para otros países, poniendo al productor en una posición estratégica para su suministro.

Por otro lado, los **Minerales Críticos** (MC), son definidos como aquellos que con el aumento de la demanda podrían sufrir una escasez, poniendo en riesgo los intereses de cada país. Además, tienen 3 características principales; son esenciales para la seguridad nacional, la cadena de suministro puede verse interrumpida por diversas causas ajenas a las nacionales, y tienen una función esencial en la fabricación de productos o servicios (Nassar y Fortier, 2021). En esta investigación les llamaremos **Elementos Críticos** (ECR) en vez de minerales críticos, dado a que, a pesar de la relación entre los elementos con los minerales, el objetivo sigue siendo los elementos; y **Materiales Críticos** (MCR) cuando incluyen minerales y otro tipo de materiales.

Los autores Erdmann y Graedel (2011) presentan una tabla periódica (FIG. 8) en la que muestran de acuerdo con diferentes estudios, el número de veces que un elemento se ha definido como crítico. Se puede apreciar que diversos elementos son o han sido considerados estratégicos e importantes. Los elementos que han aparecido como críticos varía dependiendo el país y el año, por ello es importante comprender que esta clasificación es dinámica y va de acuerdo con las necesidades analizadas al momento de su elaboración.



evaluaron 59 materiales (a causa de la disponibilidad de información) (Nassar y Fortier, 2021); determinando como críticos aquellos que presentan las características siguientes:

1. Que la producción global se encuentre centralizado en países que puedan llegar a cortar el suministro a Estados Unidos.
2. La dependencia del consumo local sea mayormente extranjera.
3. El consumo representa gran gasto para las industrias de manufactura con poca rentabilidad, pero contribuyen a gran medida en la economía de país

Además de estos criterios, los autores analizaron el suministro doméstico de materias primas que dependen de únicamente un productor para diferentes cadenas de valor, considerándolas automáticamente para análisis de criticidad. Algo importante que destacar es que se menciona que esta lista no es estática y que se tendrá que mantener en constante revisión cada año.

La lista de MCR actualizada al 2022, contiene 48 elementos y dos minerales, barita y grafito (FIG. 9) (U.S. Geological Survey, Department of the Interior, 2022) fue elaborada de acuerdo con este método cuantitativo, para más detalles del método se puede consultar en Nassar y Fortier (2021).

### **Canadá**

Otro ejemplo es la lista de Canadá, Que desarrolló La Estrategia de Minerales Críticos Canadiense (Government of Canada, 2022), en el que se enfatiza una estrategia que busque llevar de la exploración al reciclaje, en la cual, se incentive una economía verde y digital para su país y el mundo. En este mismo documento se presentan las características que debe de tener un mineral para ser considerado crítico y son:

1. Es esencial para la seguridad económica del país y su suministro se ve amenazado.
2. Es necesario para la transición a una economía baja en carbono a escala nacional.
3. Es una fuente sostenible de minerales críticos altamente estratégicos para los socios y aliados del país.

Para desarrollar su lista se llevaron a cabo consultas en las diferentes provincias, territorios y expertos representantes del sector industrial; otro aspecto a remarcar es que se tomaron en cuenta los minerales producidos por provincia y se reconoce a Canadá como un fuerte proveedor nacional e internacional de materiales críticos.

La estrategia empleada tiene un fuerte fundamento en la sostenibilidad y la transición energética, y no solo del país, también analizan las necesidades de países aliados, lo cual, puede darles una ventaja en la producción de las materias primas. Esta lista, contiene 29 elementos, el grafito y la potasa (Government of Canada, 2022). Como se puede observar, existen poca diferencia entre la lista creada por el Gobierno de Estados Unidos y la de Canadá (FIG. 9).



FIG. 9 TABLA PERIÓDICA EN DONDE SE MUESTRAN LOS ELEMENTOS CONSIDERADOS COMO CRÍTICOS PARA ESTADOS UNIDOS Y CANADÁ. LISTAS TOMADAS DE (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, DEPARTMENT OF THE INTERIOR, 2022) Y (GOVERNMENT OF CANADA, 2022).

## Unión Europea

La Unión Europea (UE) aprobó la Ley Europea de Materias Primas Críticas el 16 de marzo de 2023. Esta legislación destaca la dependencia de los países miembros de la UE de las importaciones de diversos materiales indispensables para industrias

clave como la limpieza, la digital, la aeroespacial y la defensa nacional. Esta dependencia se hizo evidente durante la pandemia de Covid-19 y la invasión de Rusia a Ucrania, que provocaron cortes en el suministro de materiales. Además, la presidenta de la UE Ursula Von der Leyen menciona: "...esta Ley impulsará significativamente el refinamiento, procesamiento y reciclado de materias primas..." (European Commission, 2023). Asimismo, se identificaron los materiales estratégicos haciendo énfasis en que su provisión pueda someterse a futuras interrupciones.

Para determinar una lista de MCR, se realizó una evaluación cuantitativa en el 2020 (European Comission, 2020), analizando un total de 66 materiales, de los cuales 60 se valoraron individualmente y 3 grupos (tierras raras pesadas, tierras raras ligeras y el grupo del platino) con un total de 83 materiales (FIG. 10). Cabe señalar que esta es la quinta lista elaborada por la UE, la primera fue presentada en el 2011. Los parámetros utilizados para definir la lista actual fueron (European Commission, 2023):

1. Importancia Económica (en el eje vertical): Por la importancia del material en la economía europea en términos de aplicaciones de uso final y valor agregado de los diferentes sectores manufactureros de la región; del mismo modo, se toma en cuenta el rendimiento técnico y los costos de los sustitutos en aplicaciones individuales.
2. Riesgo de suministro (en el eje horizontal): fundado por la concentración de producción del material en determinados países, considerando el desempeño de su gobernanza y aspectos comerciales. Los grupos de países tomados en cuenta son: los proveedores globales y los que abastecen a la UE. Esta se mide en la etapa de extracción y procesamiento; por último, la sustitución y el reciclado son considerados como reductores de riesgo.

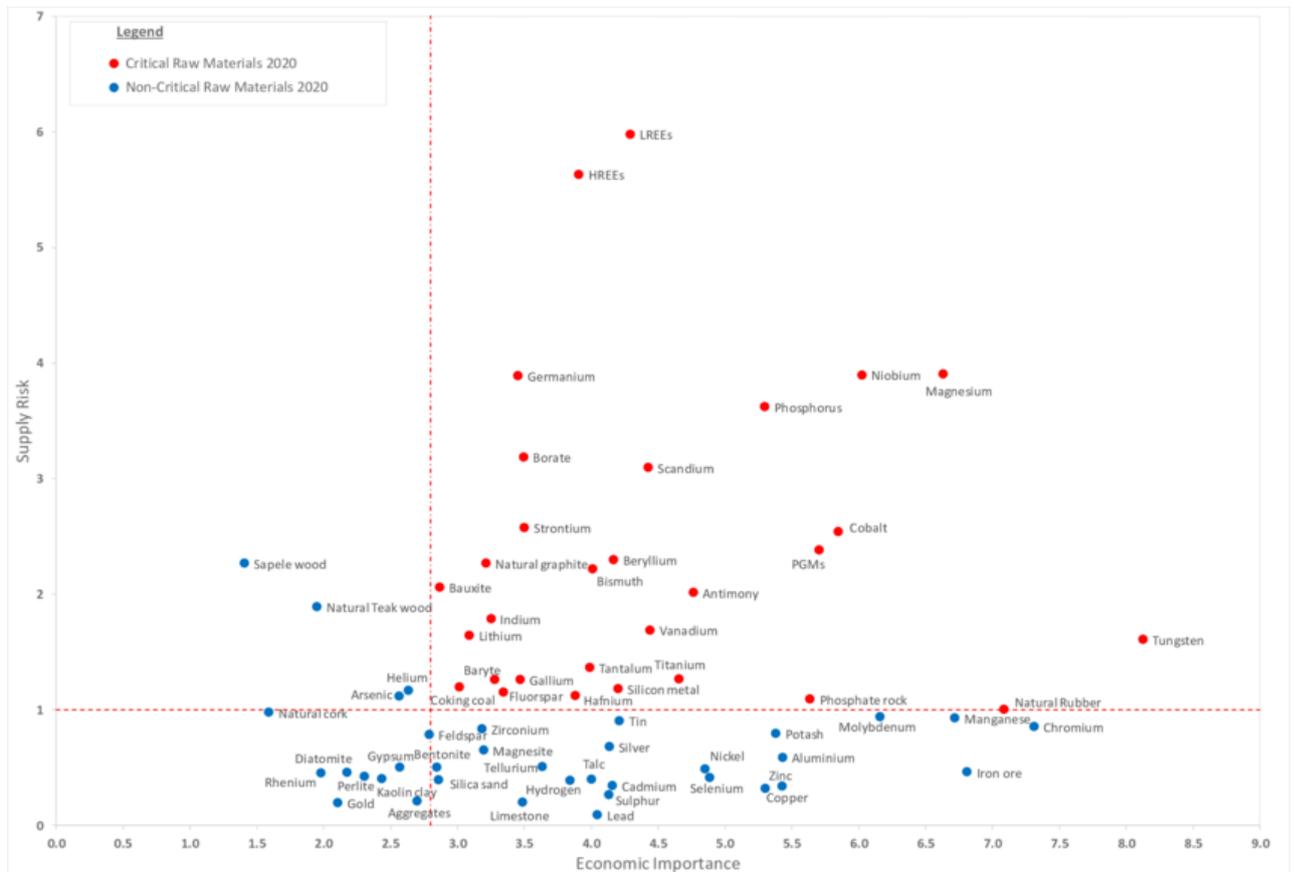


FIG. 10 EVALUACIÓN DE CRITICIDAD DEL 2020, POR PARTE DE LA COMISIÓN EUROPEA. RESULTADOS DE LA IMPORTANCIA ECONÓMICA Y EL RIESGO DE SUMINISTRO. TOMADO DE (EUROPEAN COMMISSION, 2020).

## Australia

Australia cuenta con una estrategia 2023-2030 dirigida al sector de minerales críticos, el cual busca ser crecer su estrategia de este sector de explotación de minerales y sus beneficios económicos, siendo un productor global que provea de materias primas a diferentes cadenas de valor. Ubicándose como importante pieza para la transición energética gracias a 3 características que poseen: sus grandes reservas minerales, su vasta experiencia en la extracción de estos y contar con un historial sólido y confiable como productor y exportador de energía y recursos minerales (Department of Industry, Science and Resources, 2023).

La estrategia tiene como base el establecer prioridades que respalden 6 áreas en específico: comunidades, industria, inversionistas, el sector de investigación e innovación, estados y territorios, y socios internacionales; debido a la colaboración con cada uno de ellos. Como resultado, la lista con la que cuenta el país se basa en las necesidades de la industria de tecnología, reducción de emisiones y el desarrollo

en manufactura y defensa nacional (Department of Industry, Science and Resources, 2023).

Además de las listas de estos países, otros países han desarrollado las suyas, tales como China, Corea del Sur, Japón, Sudáfrica, India y Reino Unido.

### **Argentina**

La República de Argentina desarrolló un método dinámico considerando recursos como: disponibilidad de recursos minerales, disponibilidad técnica, disponibilidad ambiental y social, disponibilidad geopolítica, aspectos económicos locales y contexto internacional. En especial, este estudio hace una relación entre la importancia económica y la disponibilidad de las materias primas minerales, llegando a dos clasificaciones: minerales críticos y minerales de importancia económica estratégica, lo cual, permite ubicar al país, como componente clave en la geopolítica. Además, identifica aquellos minerales con potencial para el desarrollo (Zappettini, 2021) (FIG. 11).

Como se puede apreciar, es una clasificación dinámica, en la que la importancia económica, se modifica de acuerdo con las necesidades de la industria, las cuales son dictadas por el avance tecnológico. Por otro lado, la tasa de explotación puede presentarse como una oportunidad para el desarrollo nacional, siendo que, al identificar recursos potenciales, este escenario cambia a ser productor de ellos (Zappettini, 2021).

El caso argentino es un claro ejemplo de una evaluación interna y externa del contexto actual y futuro de los minerales críticos, adicionalmente, establecer el punto de partida en la explotación y el suministro, permite tener una visión estratégica del papel a tomar de acuerdo con el contexto del país y las demandas y oportunidades de mercado. Del mismo modo, funge como un piso base para la creación de políticas públicas que regulen y permitan un buen manejo de sus recursos naturales.

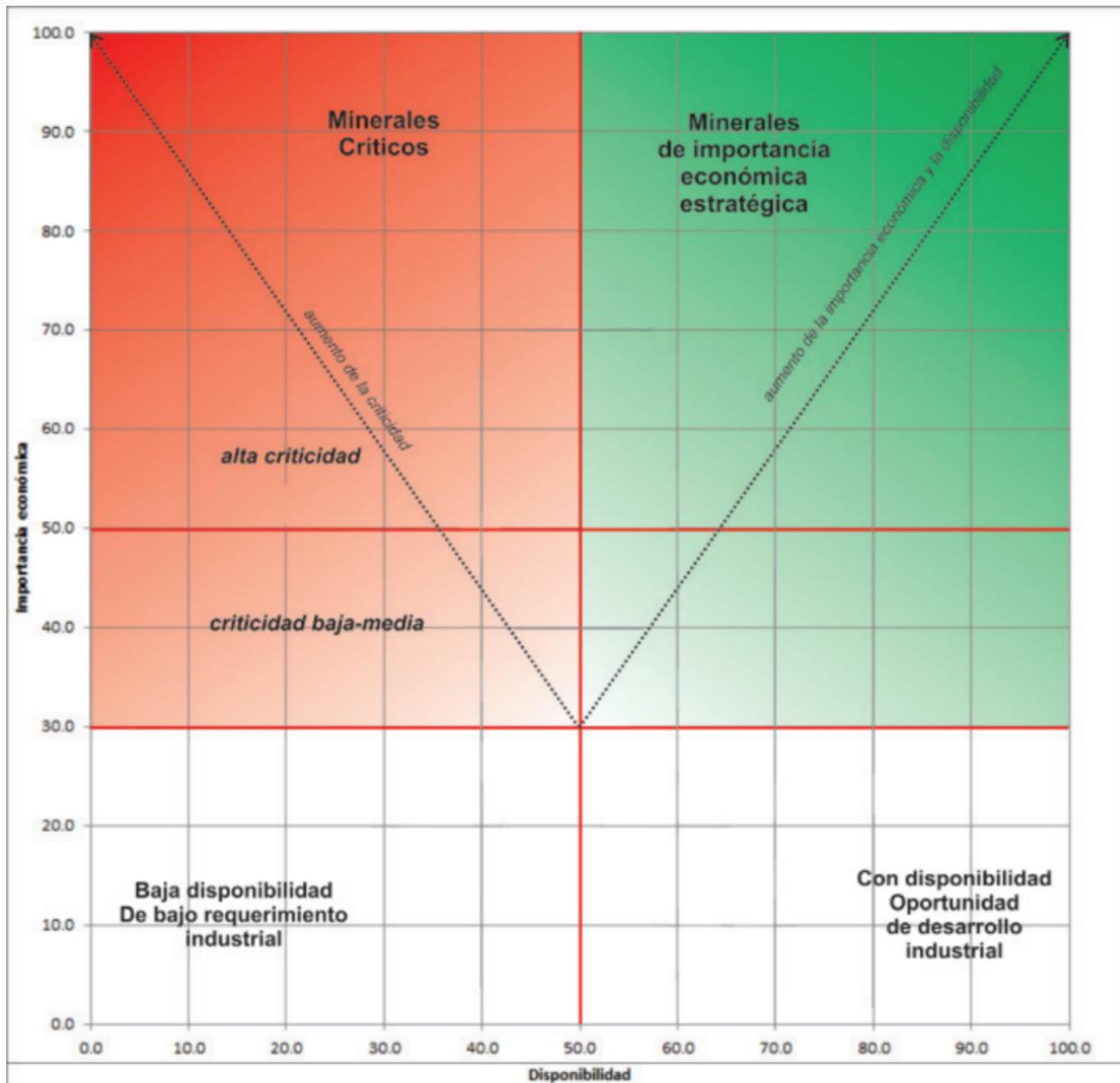


FIG. 11 CUADRO DE CRITICIDAD DE MATERIAS PRIMAS DE ARGENTINA, TOMADO DE (ZAPPETTINI, 2021). DE COLOR ROJO SE MUESTRAN LOS VALORES CONSIDERADOS PARA LOS MINERALES CRÍTICOS Y DE VERDE AQUELLOS CONSIDERADOS DE IMPORTANCIA ECONÓMICA ESTRATÉGICA.

## Colombia

En el 2014 se tenía establecidos 11 minerales que eran estratégicos para el desarrollo económico de Colombia. La necesidad de actualizar la lista de minerales estratégicos para el país surge por la evidente demanda de minerales y los planes realizados por diversos países. Por ello, en el 2020 se busca aplicar el método de la matriz de criticidad aplicada por la UE (FIG. 10), con modificaciones a las necesidades nacionales. Así actualizar aquella lista que se elaboró años atrás.

La metodología empleada se enfoca en 3 fases:

1. Fase uno: Análisis de mercados nacionales e internacionales de minerales
2. Fase dos: Aplicación de matriz de criticidad adaptada (tomando en cuenta los aspectos que dificultan la explotación de los minerales dentro del país).
3. Fase tres: Validación de los resultados con un comité de expertos (profesionales e investigadores del sector minero).

Colombia considera estratégicos los minerales denominados críticos para otros países, además adapta la metodología ya existente a sus condiciones internas para determinar su listado. La división en fases de su elaboración les permite hacer un plan escalonado en donde participen diferentes partes involucradas y puedan así llegar a una conclusión que tome en cuenta aspectos internos como externos.

### **Importancia de los Materiales Críticos en la política internacional e interna**

Este tema es de gran importancia, ya que dicta la geopolítica actual y futura, situando a la minería en una posición estratégica para lograr los objetivos globales. Un ejemplo claro es el suministro de elementos críticos para el desarrollo de nuevas tecnologías y de energías renovables; la preocupación de Estados Unidos de América (EUA) y la Unión Europea se intensifica ante el claro dominio de China en las cadenas de producción y procesamiento por lo que se han buscado alianzas y acuerdos con diferentes países para asegurar el suministro de materias primas y así, no poner en riesgo sus cadenas de producción (Castillo y Purdy, 2022). Sin embargo, las alianzas que se han generado entre estas naciones que comparten los mismos intereses no son suficientes para lograrlo; países como Indonesia, Chile, Bolivia y México, entre otros, aparecen como piezas clave para cubrir la demanda de metales (Swanson, 2023).

Definir qué minerales o compuestos forman parte de los MCR es dependiente del contexto y prioridades de cada nación. Estas clasificaciones están sujetas a las industrias, tecnologías, cadenas de producción e infraestructura de cada región; este término es dinámico, y es indispensable adecuarlo a los intereses domésticos y en perspectiva del comercio internacional (Hayes y McCullough, 2018). Las listas existentes de estos MCR son principalmente elaboradas por países desarrollados; no obstante, los países en desarrollo adoptan estos listados sin establecer criterios

propios que se adapten a sus escenarios internos, por lo tanto, es imprescindible establecer listas que se adecúen a su estrategia económica y política a largo plazo (Hayes y McCullough, 2018), más allá que en cumplir con las necesidades de otras naciones, sino como un planteamiento en el que se tenga como objetivo el desarrollo económico interno y en tratados comerciales más equilibrados.

Por último, uno de los aspectos más relevantes para el desarrollo de esta investigación es que la intensa demanda de materiales críticos, puede ser el principio para la búsqueda de fuentes no convencionales de dichos elementos. Los residuos mineros pueden ser una importante fuente de ellos, desde los sitios históricos que necesitan ser removidos para la remediación del sitio, hasta en el perfeccionamiento de operaciones activas. El cambio hacia un mayor aprovechamiento de residuos debe traer consigo una nueva visión de la industria minera, en la que el manejo de residuos vaya en paralelo con el total entendimiento del potencial económico de los mismos.

---

### 1.5.3 LOS ELEMENTOS CRÍTICOS EN LATINOAMÉRICA Y MÉXICO

---

#### **México**

Desde hace siglos, México comenzó con su importante historia minera. En la actualidad, es el mayor productor de plata, manteniéndose en ese puesto por más de una década. Además, forma parte de las listas de los primeros 10 productores a nivel mundial de 17 de minerales y elementos, entre los que destacan el tungsteno, molibdeno, barita, zinc, oro, cobre, entre otros; siendo el país número uno en inversión de exploración en América Latina (Secretaría de Economía, 2023). Como se puede ver, para EUA y Canadá algunos de los elementos mencionados son considerados como críticos, por lo que pone a nuestro país en una posición estratégica.

En nuestro país, los minerales denominados como críticos son principalmente los considerados para una transición energética y tecnologías libres de carbono (Mining México, 2022), los cuales son: el cobre, magnesio, manganeso, plata y grafito. Sin embargo, se ha llegado a hablar de México como el proveedor de estos minerales a Estados Unidos con el objetivo de estrechar las relaciones comerciales entre ambos países (Alcántara, 2022). Ahora bien, es fundamental realizar una pregunta, ¿Estos MCR listados presentan elementos que son verdaderamente críticos para nuestro

país, o es necesario desarrollar un listado de acuerdo con nuestra estrategia de nación tomando en cuenta nuestras actividades económicas e industriales en contexto con las nuevas exigencias y acuerdos internacionales?

Esta pregunta es compleja ya que involucra diversos factores políticos, de intereses y, en especial, pone en manifiesto la situación de países que se encuentran en vías de desarrollo. Por este motivo, es importante realizar un análisis multifactorial, que contemple nuestras actividades económicas, importaciones y exportaciones, alianzas y acuerdos comerciales, listados de elementos de diversos países, nuestros recursos naturales; pero, sobre todo, que estos factores aterricen en un plan de nación para un mejor manejo de nuestros recursos y permita el crecimiento económico relacionado con los MCR.

---

#### 1.5.4 CÓMO SE ENCUENTRAN LOS ELEMENTOS CRÍTICOS

---

Las materias primas minerales o ECR pueden ser divididos de acuerdo con su ocurrencia con otros elementos y su viabilidad de extracción en tres categorías: **primarios**: Único producto que justifica su extracción, **coproductos**: Dos o más productos que juntos hacen el minado económicamente viable y **subproductos**: Son productos en cantidades significativamente pequeñas que son económicamente viables extrayéndose con uno primario (Schulz et al., 2017) en (Hayes y McCullough, 2018).

Los subproductos, son un término clave para abordar la idea de la asociación que existe entre los elementos y de la dependencia del suministro en otros, esto, debido a que muchos de ellos no se encuentran como primarios en los yacimientos. Los autores Nassar et al. (2015) desarrollaron una rueda de la compañía de metales (FIG. 12), en la que muestran 62 metales y metaloides y su relación con su producción primaria los metales con los que están relacionados.

Con esta asociación, podemos comprender que la explotación de algunos metales depende de la extracción de otros; la relación estrecha entre su compatibilidad y afinidad geoquímica tiene que ser estudiada para el aprovechamiento de nuestros recursos minerales. Como se ha mencionado antes, los minerales que ahora son

críticos, en un pasado probablemente no eran considerados económicamente explotables, por lo que es posible, que en los materiales descartados puedan ser fuente de ECR que ahora son necesarios.

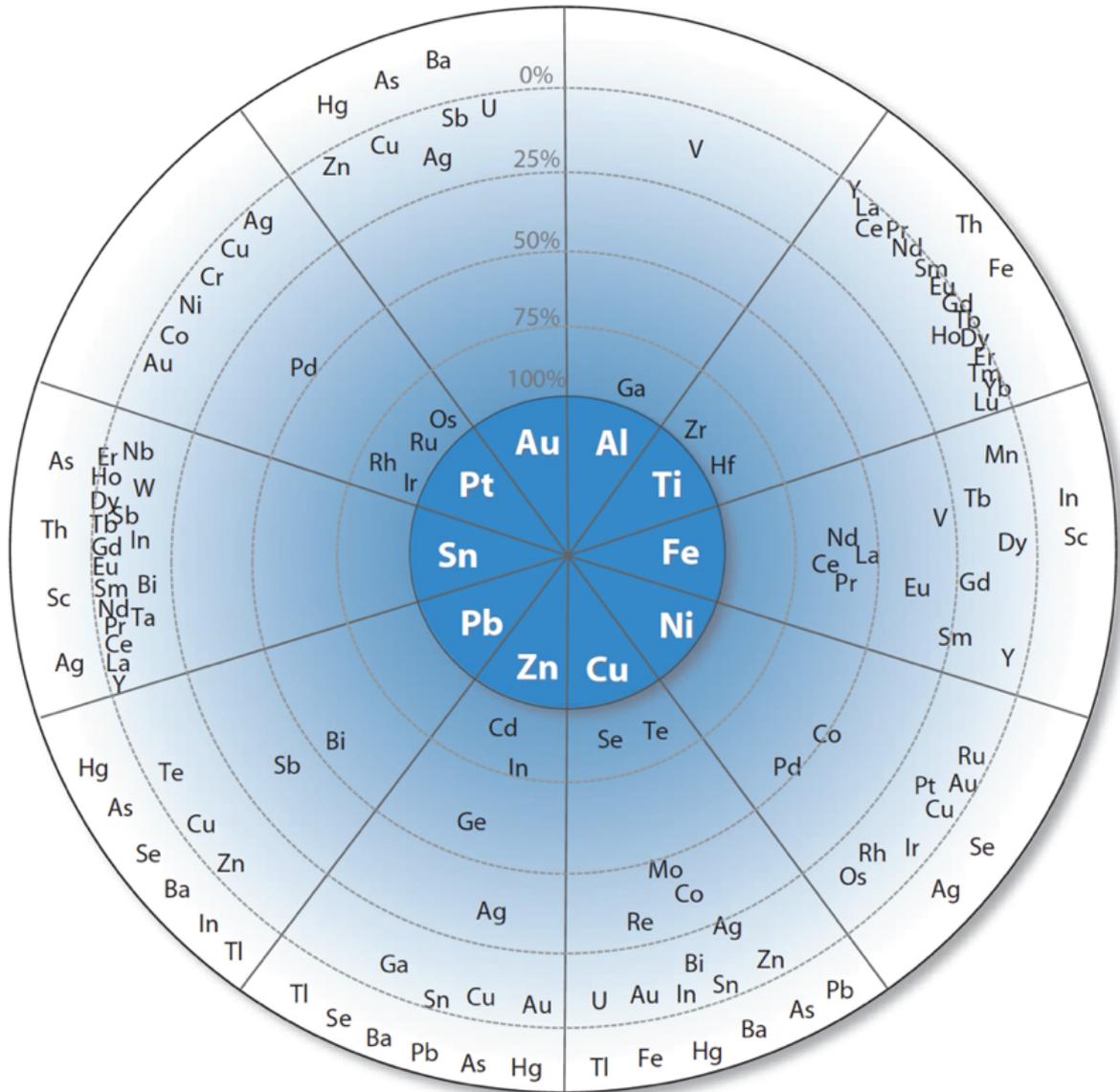


FIG. 12 RUEDA DE COMPAÑÍA DE LOS METALES. EL CENTRO REPRESENTA LOS METALES PRIMARIOS Y HACIA AFUERA, SE ENCUENTRAN LOS METALES HUÉSPED. LA DISTANCIA AL CENTRO INDICA EL PORCENTAJE DE PRODUCCIÓN PRIMARIA (100%-0%). TOMADO DE (NASSAR ET AL., 2015).

## 2 OBJETIVOS E HIPÓTESIS

---

### **Objetivos**

El objetivo general de esta investigación es:

1. Desarrollar un modelo que combine el manejo de residuos mineros con los principios de la Economía Circular (EC), con el fin de valorizar estos residuos y mitigar los posibles impactos ambientales y en la salud humana. Este modelo debe considerar los residuos mineros como una potencial fuente de materiales críticos o estratégicos, destacando la necesidad de una caracterización exhaustiva (física, química y mineralógica) para evaluar su viabilidad económica y su reintegración ambiental.

Los objetivos particulares son los siguientes:

- 1.1. Proponer una clasificación de elementos críticos/estratégicos para México, de acuerdo con una categorización basada en el contexto industrial y comercial. Además, presentar una estrategia para su desarrollo e implementación que vincule al Estado, industria y academia.
- 1.2. Por medio del estudio de los residuos provenientes dos sitios minero-metalúrgicos de Cananea, Sonora (jales provenientes de la separación por flotación) y de Matehuala, San Luis Potosí (escorias producto de la fundidora inactiva y suelos contaminados con polvos de fundición). Determinar el potencial de valorización de dichos residuos, dentro de un marco de EC, para la obtención de materiales clasificados como críticos o estratégicos para México.

Los objetivos referidos al objetivo particular 2. son los siguientes:

- 1.2.1. Determinar las características físicas y químicas de los residuos, así como las concentraciones de los elementos de interés económico.

- 1.2.2. Determinar las especies mineralógicas o químicas presentes en el residuo.
- 1.2.3. De acuerdo con las características previamente analizadas, determinar el potencial de valorización de los materiales analizados en línea con el modelo de Economía Circular en el objetivo general.
- 1.2.4. Definir la existencia de materiales críticos en el residuo, utilizando las listas de minerales críticos estudiadas y la propuesta generada en el objetivo particular 1.1.

### **Hipótesis**

Se anticipa que el modelo de Economía Circular enfrentará numerosos desafíos, dado que un enfoque a esta escala requiere la colaboración de diversos actores y el desarrollo de conocimiento en múltiples áreas relacionadas.

En cuanto a los materiales críticos o estratégicos para México, se espera que la lista se base en una estrategia interna para el país en lugar de consideraciones geopolíticas. Más que competir en los mercados internacionales, esta estrategia buscará establecer una base para comprender la importancia de la minería en el suministro de materias primas tanto en la economía interna como externa del país.

El modelo de Economía Circular propuesto permitirá determinar la presencia de metales de interés considerados en una estrategia nacional en los residuos de los sitios de estudio. De acuerdo con el contexto geológico que dio origen a los yacimientos minerales y, por lo tanto, a los residuos, se espera encontrar concentraciones valorizables de Cu y Re en los residuos de Cananea, Sonora, y concentraciones recuperables de Zn y tierras raras en Matehuala, San Luis Potosí. Además, se anticipa que se necesitarán implementar varias técnicas para su caracterización mineralógica, ya que los residuos en ambos sitios han pasado por procesos de beneficio y separación, lo que puede generar especies químicas complejas y minerales secundarios o amorfos. Sin embargo, con una adecuada selección de técnicas, su caracterización será posible.

### 3 SITIOS DE ESTUDIO

#### 3.1 CANANEA, SONORA

##### 3.1.1 UBICACIÓN Y CONTEXTO GEOGRÁFICO

La mina Buenavista del Cobre se ubica en la parte norte-central del Estado de Sonora, en el municipio de Cananea (FIG. 13), el cual, colinda al norte con los municipios de Santa Cruz y Naco; al este con Fronteras; al sur con Bacoachi y al oeste con Imuris. Se encuentra aproximadamente a 40 km al sur de la frontera con Estados Unidos y a aproximadamente 220 km al noreste de Hermosillo, la capital de Estado.

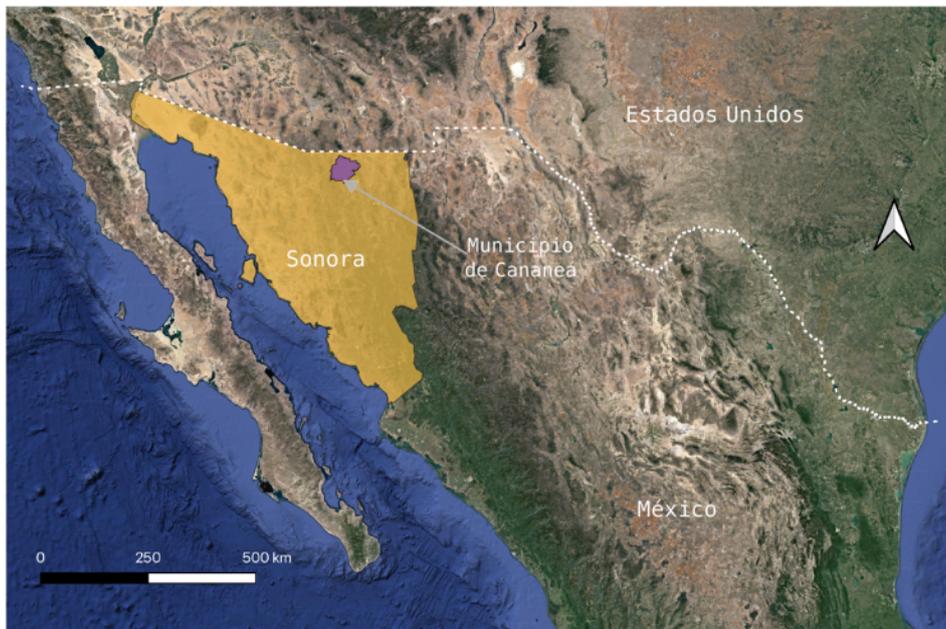


FIG. 13 LOCALIZACIÓN DEL MUNICIPIO DE CANANEA, SONORA.

Sus provincias fisiográficas son en un 68.94% la Sierra Madre Occidental y en un 31.06% las Sierras y Llanuras del norte. El clima del municipio es mayormente semiseco templado y en menor medida seco templado. Cuenta con una precipitación anual de 300-800 mm. Sus regiones hidrológicas son en un 46.9% Sonora Sur, Colorado 41.355% y Sonora Norte 11.75%; las corrientes de agua en el municipio son El río Sonora una corriente perenne y cuenta con diversas intermitentes como lo es, el arroyo El Barrilito, el cual nace en Cananea y alimenta al río San Pedro, dicho río, será muy importante para esta investigación (INEGI, 2010).

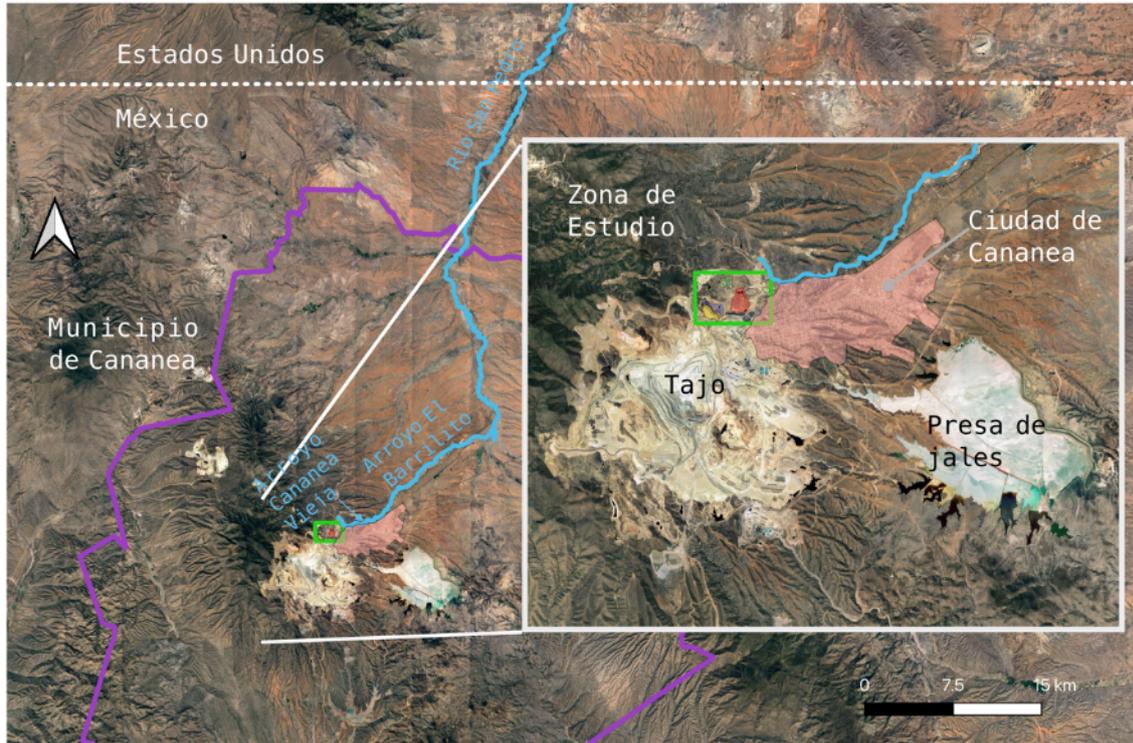


FIG. 14 ÁREA DE ESTUDIO EN CANAEA SONORA, ARROYOS Y RÍOS IMPORTANTES. EN EL SITIO DE MINA: DEL LADO DERECHO SE ENCUENTRA LA PRESA DE JALES Y DEL LADO IZQUIERDO EL TAJO. EN EL RECUADRO VERDE, LA ZONA DE ESTUDIO CON RESIDUOS ANTIGUOS.

El yacimiento mineral de Buenavista del Cobre forma parte del distrito minero de Cananea conformado por diferentes depósitos de Cu que junto con los de Arizona y Nuevo México representan una de las Provincias de Cu más importantes del mundo.

### 3.1.2 CONTEXTO GEOLÓGICO Y MINERO DE SONORA Y CANAEA

El Estado de Sonora a lo largo de su evolución geológica se ha visto sometido a diferentes eventos que han dado pie al emplazamiento de diferentes tipos de yacimientos metálicos y no metálicos. Es un importante productor de minerales metálicos como: cobre, molibdeno y oro; y de no metálicos como: grafito, wollastonita y barita. Es el mayor productor de cobre a nivel nacional, representando el 83.4% de la producción (595, 200.88 t), siendo la empresa Buenavista del Cobre (BVC) la que reporta la mayor cantidad, la cual realiza una explotación a cielo abierto en Cananea, Sonora. Otros metales que destacan en esta entidad son el molibdeno, selenio y tungsteno, ya que el estado participa con el 100% de producción nacional (SGM, 2020).

Esta importante participación en la producción mineral nacional se debe a que el Estado cuenta con yacimientos ricos minerales con una amplia distribución, entre ellos se tienen: yacimientos de tipo pórfido de cobre, epitermales, skarn y oro orogénico, entre los más notables. Los depósitos de Cu-Mo y Au (Cu) son los más importantes y extensos de México, sin embargo, para su comprensión, es necesario explorar aquellos eventos orogénicos que permitieron su evolución (Ochoa-Landín et al; 2011).

Los pórfidos de Cu en México forman un cinturón con una orientación NE-SW principalmente en la parte noroeste del país en los estados de Sonora y Sinaloa. Los pórfidos de Sonora junto con los de Arizona y Nuevo México, representan depósitos importantes a escala mundial (Valencia-Moreno et al., 2006).

### **Distrito de Cananea**

Este distrito incluye los depósitos de Buenavista del Cobre, Mariquita, María Lucy, Milpillas y El Alacrán, los cuales en conjunto conforman el complejo de pórfidos más importante del país (Valencia-Moreno et al., 2006). Desde 1936 ya se tenían definidas rocas de diferentes categorías como: sedimentos paleozoicos; flujos volcánicos, tobas y brechas; rocas intrusivas de diversos tipos generalmente más recientes que los volcánicos; y diques y pórfidos de cuarzo, más recientes que los intrusivos a mayor profundidad (Valentine, 1936).

Para comenzar a comprender la geología, el basamento del distrito de Cananea se compone por aproximadamente 1000 m de cuarcitas y carbonatos del Cámbrico al Carbonífero, las cuales sobreyacen de manera discordante al granito Cananea que tiene una edad de  $1,440 \pm 15$  m.a. de acuerdo con estudios isotópicos de U-Pb en zircones (Anderson y Silver, 1977). Por encima de estas, se encuentra un complejo de rocas volcánicas (tobas y flujos del Jurásico) representadas por las formaciones Elenita (félsicas) y Henrietta (de félsicas a intermedias) descritas originalmente por Valentine (1936). Sobre el complejo de rocas volcánicas que coinciden con la edad de la orogenia Laramide, caracterizadas por las formaciones Mariquita y Mesa con un espesor de hasta 1500 m compuestas de andesitas y dacitas (Bushnell, 1988).

El equivalente plutónico de estas rocas incluye la diorita Tinaja, la granodiorita Cuitaca y la monzodiorita El Chivato, con edades U-Pb en zircones de  $64 \pm 3$  y  $69 \pm 1$  m.a., para las dos últimas (Anderson y Silver, 1977). Se ha observado que estas rocas evolucionaron por asimilación o cristalización fraccionada a partir de un fundido parental derivado del manto (Wodzicki, 2001). La mineralización, se ha asociado a inyecciones tardías de plutones cuarzo-feldespáticos y riolíticos con edades de entre  $59.9 \pm 2$  M.a. y  $57.4 \pm 1.6$  m.a. (Wodzicki, 2001). De acuerdo con datos Re-Os en molibdenita y U-Pb en zircones de los plutones, la actividad magmática ocurrió entre 77.7 y 57.8 m.a. el pulso de mineralización en Buenavista del Cobre ocurrió entre 59.2 a 59.3 m.a., lo cual indica una mineralización relativamente rápida (Del Rio-Salas et al., 2015).

---

### 3.1.3 PÓRFIDOS DE COBRE Y SUS SUBPRODUCTOS

---

#### **¿Qué son y cómo se forman los pórfidos?**

Los pórfidos de Cu son una importante fuente de metales como el Cu, Mo, Au, Sn y W (ordenados del más, al menos abundante) (Seedorff et al., 2005), siendo la más indispensable para el suministro de Cu y Mo en el mundo. Su génesis se asocia al emplazamiento de plutones calco-alcalinicos o magmas tipo I con una cantidad de agua relativamente baja a una profundidad de entre 5 y 15 km (Robb, 2015). El emplazamiento, muestra una marcada relación con su contexto tectónico, ya que se ha visto una fuerte concentración en zonas de subducción tipo Andina, un claro ejemplo de esto, son los yacimientos en Chile y Norteamérica, los cuales presentan formas de cinturones lineales que siguen la línea de subducción (Sillitoe, 1972).

Las concentraciones anómalas de metales en estos sistemas son producidas por diversos factores, en primer lugar, los fluidos o soluciones hidrotermales fracturan la roca y transportan a los metales, generando grandes zonas de alteración hidrotermal en donde ocurre la precipitación de los metales en vetas o vetillas (Tittley, 1981; Seedorff et al., 2005). Además de los fluidos, la roca en donde se emplazan los cuerpos y fluidos es un componente determinante, ya que ésta dicta el tamaño de los depósitos, el grado y la mineralización (Sillitoe, 2010).

La actividad magmático-hidrotermal da pie a la formación de otro tipo de depósitos minerales tales como: skarns, reemplazamiento de carbonatos, depósitos epitermales

de alta e intermedia sulfuración y depósitos de oro en sedimentos (en zonas aledañas a la mineralización) (Sillitoe, 2010).

Para facilitar el estudio de estos depósitos de gran volumen, se han desarrollado modelos de zoneamiento horizontal y vertical (FIG. 15); dicho ordenamiento, se relaciona con las alteraciones minerales; en la zona central la mena es principalmente bornita y calcopirita (pudiendo haber oro, molibdenita y enargita), en las zonas periféricas se presenta abundante pirita.

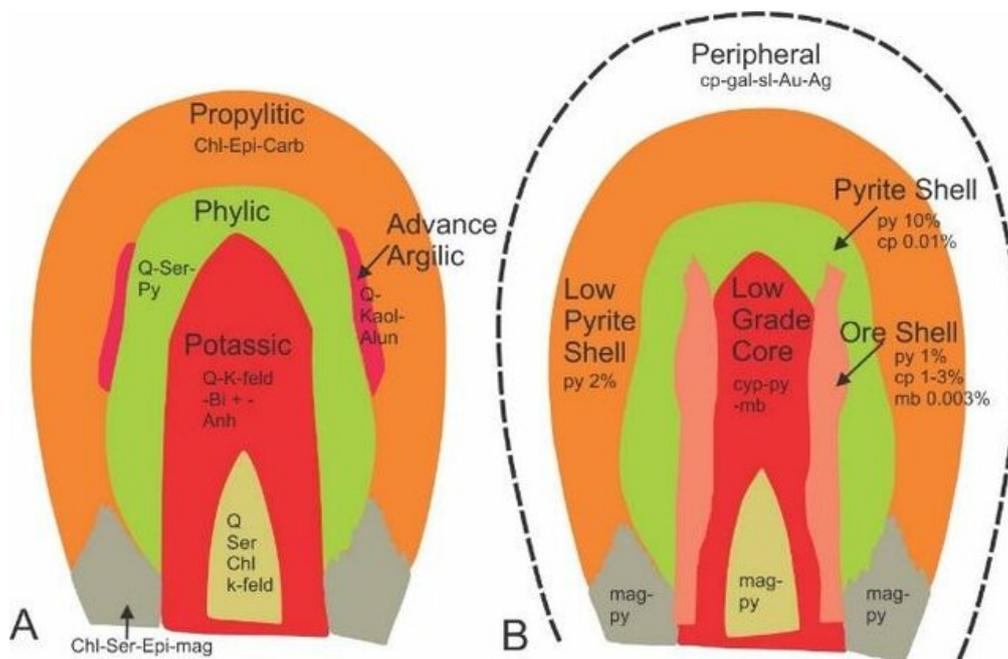


FIG. 15 ZONEAMIENTO DE ALTERACIÓN-MINERALIZACIÓN PARA UN PÓRFIDO CUPRÍFERO (LOWELL Y GUILBERT, 1970). TOMADO DE (MURAD ET AL., 2021).

Los pórfidos se han clasificado de diferentes formas, una de ellas se refiere a la mena dominante, los cuales pueden ser principalmente Cu-Mo (cuando el Cu es más abundante que el Mo y puede haber Au), Mo-Cu (cuando el Mo es más abundante y ocasionalmente contiene W). Para la formación de los diferentes tipos de pórfidos, se conjuntan diversos elementos (profundidad, composición del fundido, roca encajonante, entre otros) los cuales, junto con la compatibilidad y coeficientes de partición de los metales, favorecen o no la concentración y precipitación, dando origen a diferentes tipos de depósitos minerales (FIG. 16) (Robb, 2015).

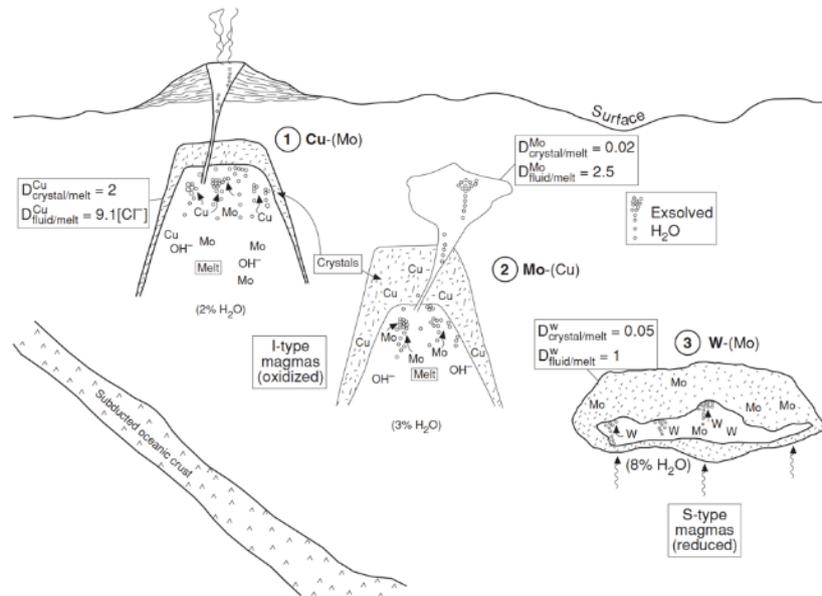


FIG. 16 MODELO ESQUEMÁTICO DEL ORIGEN Y FORMACIÓN DE DIFERENTES TIPOS DE PÓRFIDOS. TOMADO DE (ROBB, 2015).

### Subproductos de los pórfidos

Algunos estudios se han realizado para entender la relación de los pórfidos de cupríferos y elementos de interés económico, gracias a esto, se ha podido identificar que el Re, Se y Te se encuentran presentes en pórfidos de Cu, lo cual lo hace muy atractivo ya que estos elementos carecen de mena primaria, de acuerdo con John y Taylor (2016). El renio se ha reportado en la molibdenita en concentraciones que van desde 100 hasta 6,000 ppm en pórfidos de Cu, que, a pesar de ser concentraciones pequeñas, su recuperación se vuelve sumamente atractiva ya que este tipo de yacimientos minerales son de gran volumen (John y Taylor, 2016). El selenio se presenta en los sulfuros de Cu y Fe en solución sólida en concentraciones entre 1 hasta 600 ppm (típicamente <10ppm) (John y Taylor, 2016) en este tipo de depósitos, este elemento es recuperado como subproducto en lodos anódicos generados en la producción electrolítica de Cu (Stillings, 2017). El Telurio se ha reportado en telururos de Au, Ag y Pd en concentraciones entre <0.1 a >100 ppm (típicamente 1-10 ppm) y son recuperados de lodos anódicos con contenidos de entre 1-4% (John y Taylor, 2016).

Por otro lado, minerales del grupo del platino se han identificado en inclusiones en calcopirita provenientes de diferentes muestras de yacimientos de diferentes países, en especial, existe una fuerte relación entre depósitos de cobre relacionados con

arcos de isla ricos en Au con concentraciones entre 1 y 28 ppm y la presencia de concentraciones relativamente altas de Pd que van de 130 a 1900 ppb, mostrando una fuerte correlación entre los elementos por lo que se podría vincular con un origen común entre estos elementos (Tarkian, 1999).

---

#### 3.1.4 RESIDUOS DE CANANEA, SONORA Y JALES HISTÓRICOS (REPRESO DE LA CONCENTRADORA VIEJA)

---

Actualmente la mina BVC se encuentra dividida en dos zonas principalmente. Del lado derecho la presa de jales y del lado izquierdo el área de trabajo y los depósitos de terreros y tepetates (FIG. 14).

#### **Represos de la Concentradora Vieja (jales históricos)**

La generación de residuos en este importante yacimiento de cobre tiene sus antecedentes en 1902, cuando se estableció la primera infraestructura dedicada al almacenamiento de residuos en conjunto con la puesta en marcha de la primera planta de concentración y molienda. Además, se han encontrado registros de tres pequeñas presas de jales que estuvieron en operación entre 1909 y 1914 durante la presencia de la empresa Anaconda Copper Company. Estas presas se ubicaban al norte de la planta concentradora, donde los cursos de agua fluyen hacia el río San Pedro, que discurre hacia el norte en dirección a los Estados Unidos. Con el tiempo, con el aumento en la producción, se unieron formando el Represo Sur, comprendido por 32 hectáreas. Finalmente, desde 1940 estuvo activa una nueva presa llamada Represo Norte, que, debido al incremento en la producción, fue cerrada definitivamente en 1945. Ambos represos fueron conocidos como “Represos de la Concentradora Vieja”, en esta investigación Jales Históricos (JH) (Moreno-Vázquez, 2019) (FIG. 17).

Después de este periodo se abrieron nuevas presas de jales al sur de la mina en la Cuenca del río Sonora y continuaron con su expansión. En la actualidad, los jales de flotación son depositados en la “presa de jales No. 3”, que cuenta con una extensión de 1,412 Ha; sin embargo, se planea aumentar 917 Ha. Por lo tanto, se llegaría a tener una superficie total de 2,328 Ha.

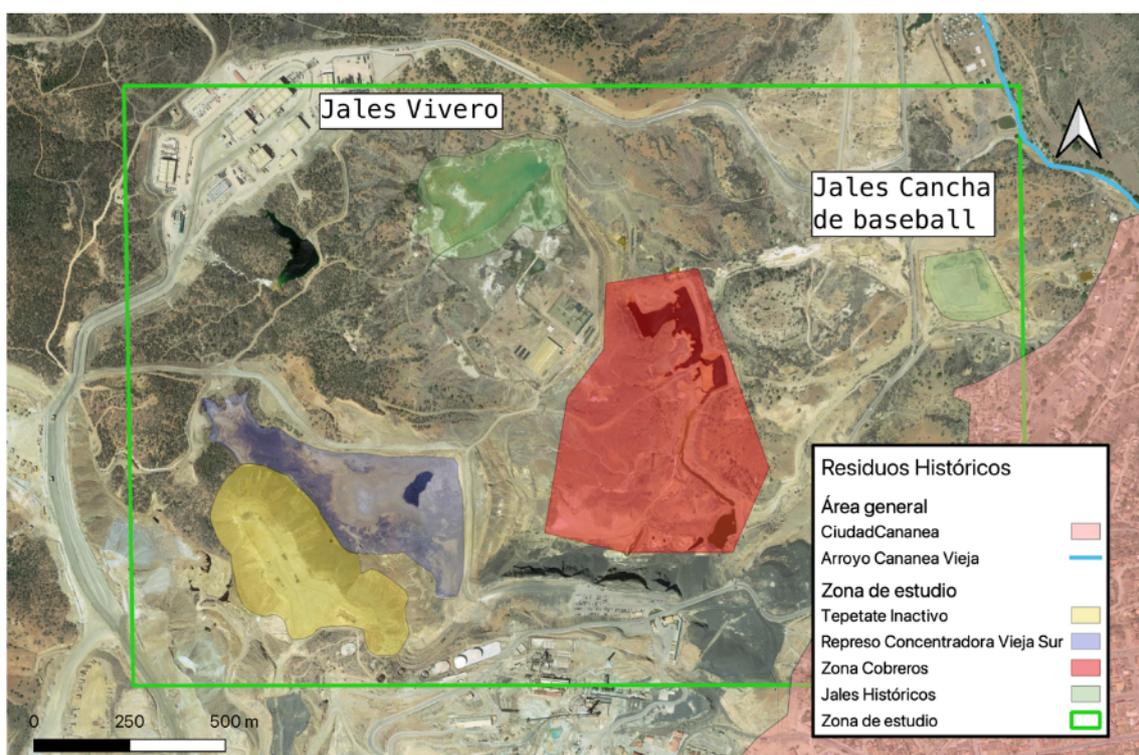


FIG. 17 RESIDUOS PRESENTES EN LA ZONA DE ESTUDIO (NORTE).

### Situación ambiental relacionada con los Jales Históricos

A diferencia de otros sitios mineros, existen pocos estudios acerca de los impactos ambientales generados por los residuos mineros históricos y, por lo tanto, en el sistema hidrológico norte el cual se encuentra en contacto con dichos residuos, sin embargo, existen algunos que evidencian el impacto ambiental que generan. El arroyo El Barrilito (AB) se encuentra en contacto con residuos históricos, el cual, es una de las corrientes que forma el río San Pedro (RSP). El RSP, fluye de Sonora a Arizona y es importante fuente de agua dulce para la agricultura y ganadería en la zona, además, de su situación transfronteriza.

De acuerdo con muestreos de agua superficial del AB y del RSP realizados en el área, se observaron concentraciones elevadas de metales como Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn, que exceden los límites máximos en criterios ecológicos para la calidad del agua (Gómez-Álvarez et al., 2004; Gómez-Alvarez et al., 2009). Los altos valores se detectaron especialmente en zonas cercanas a la concentradora vieja, en donde se toma como la fuente de contaminación lixiviados ácidos provenientes del depósito de residuos depositados entre 1940 y 1980 (Gómez-Alvarez et al., 2009). Además, el

estudio de los sedimentos en el AB muestra una clara fuente antropogénica que puede deberse a las actividades mineras y por otro lado, a las aguas negras liberadas al arroyo (Gómez-Álvarez et al., 2007).

Asimismo, cerca de los residuos, el pH en el año 1993 fue de aproximadamente de 2.9 y la CE de 11000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , sin embargo, para el año 2005 el pH aumentó a 3.9 y la CE disminuyó a 1016  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , del mismo modo, las concentraciones de todos los metales bajaron. Esto puede deberse a acciones tomadas por la empresa minera en el año 2000 de reutilización de los lixiviados (fuente de contaminación) y por el constante aporte de aguas negras provenientes de las viviendas de la ciudad de Cananea, propiciando condiciones reductoras y el aumento de pH, lo que llevó a la retención de metales por medio de sorción, precipitación y la dilución del agua. Además de estas dos condiciones, las concentraciones de los metales disminuyen proporcionalmente a la distancia entre las estaciones aguas abajo (Gómez-Alvarez et al., 2009). Gracias a estas condiciones Gómez-Álvarez et al (2011) plantean una propuesta de establecer acuerdos de cooperación entre la minera y entidades de gobierno para controlar el afluente ácido, ya que la evidente mejora que tuvo la calidad de agua debido a las medidas de reciclaje de parte de la minera.

### **Tipos de residuos**

El yacimiento muestra una marcada zonificación, determinada por la mineralogía y el contenido de Cu. Las diferencias físicas y químicas de cada zona explotada determinan la posibilidad de extraer el cobre y las técnicas para su beneficio. Por lo tanto, existen tres tipos de residuos: tepetate, mineral lixiviado y jales. Estos residuos se clasifican como residuos mineros, ya que provienen del minado o del beneficio (Tabla 6 y **Error! Reference source not found.**) (SEMARNAT, 2023).

**Tepetate:** Material sólido que no tiene valor económico. Son depositados dentro de las instalaciones de la mina y son denominados “Tepetatera Activa” (154 Ha.) y “Tepetatera Inactiva” (715 Ha.).

**Mineral lixiviado:** Material sólido que proviene del mineral fresco, el cual es lixiviado dentro de las instalaciones de BVC en los “Terreros Activos

Lixiviables”. Los residuos son almacenados dentro de las instalaciones de la minera en depósitos llamados “Terreros Inactivos Lixiviables” (539 Ha.).

**Jales:** Compuestos por minerales de ganga y sulfuros de Cu residuales, además de los reactivos utilizados en el proceso de flotación. Estos residuos contienen 50% de sólidos y 50% de agua (la cual puede ser recuperada y aprovechada en el proceso de flotación).

Los jales antiguos en la zona norte de Cananea (de la cancha de béisbol y de los talleres) y los sedimentos del Arroyo El Barrilito han sido estudiados con una perspectiva de valorización por el autor Alvirde Meléndez (2024), quien identificó que el Cu y el Mo se encuentran en concentraciones atractivas para su recuperación, con valores mayores a 1% en algunos puntos en los residuos y a lo largo del arroyo. Así mismo, realizó una recuperación del cobre en columnas con una solución ácida de ácido sulfúrico, con la cual, determinó una recuperación de cobre en los jales del 64% y del 49% en los sedimentos del sitio. Estos resultados indican que el reprocesamiento de Cu en los jales antiguos es viable y se estima que el volumen de jales en el sitio es de 884, 339.8 m<sup>3</sup> en un área de 225.6 hectáreas. Esta investigación resulta en un gran paso hacia la remediación ambiental de la zona de estudio y al mismo tiempo, es una medida para el manejo circular de los residuos.

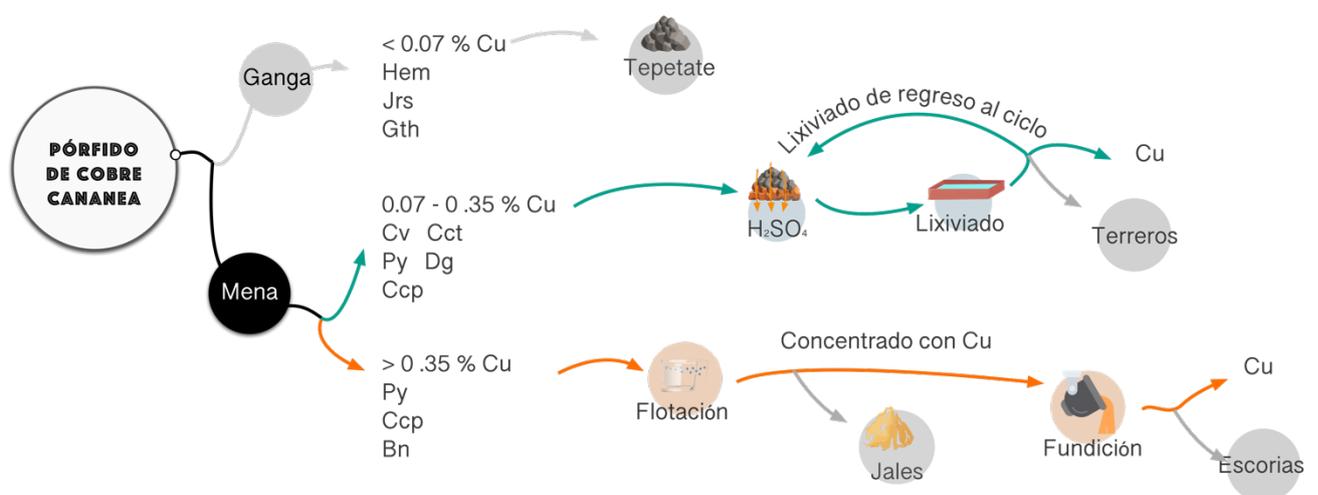


FIG. 18 DIAGRAMA EN EL QUE SE MUESTRA EL TIPO DE BENEFICIO EMPLEADO Y EL TIPO DE RESIDUOS GENERADOS, DE ACUERDO CON LA CONCENTRACIÓN DE COBRE DEL MATERIAL Y DE LA MINERALOGÍA.

TABLA 6 TIPOS DE RESIDUOS DE CANANEA, SONORA; SU RELACIÓN CON EL PORCENTAJE DE CU, MINERALOGÍA Y MÉTODO DE BENEFICIO/CONCENTRACIÓN (SEMARNAT, 2023).

Zona	Porcentaje de Cu (%)	Minerales presentes/principales	Beneficio/Concentración	Residuos
1	0-0.07	Óxidos de Fe: goethita FeOOH, jarosita $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$ y hematita $Fe_2O_3$	No es explotable	Tepetate
2	0.07- 0.35	Sulfuros secundarios: calcocita $Cu_2S$ , covelita $Cu^{+4}Cu_2^{2+}(S_2)_2S_2$ y digenita $Cu_9S_5$  Sulfuros primarios: pirita $FeS_2$ y calcopirita $CuFeS_2$	Lixiviación ácida con ácido sulfúrico con posterior recuperación selectiva del cobre metálico (extracción por solventes y deposición electrolítica)	Mineral lixiviado
3	>0.35	Sulfuros metálicos: pirita $FeS_2$ , calcopirita $CuFeS_2$ y bornita $Cu_5FeS_4$	Flotación selectiva	Jales

**Tepetate:** Material sólido que no tiene valor económico. Son depositados dentro de las instalaciones de la mina y son denominados “Tepetatera Activa” (154 Ha.) y “Tepetatera Inactiva” (715 Ha.).

**Mineral lixiviado:** Material sólido que proviene del mineral fresco, el cual es lixiviado dentro de las instalaciones de BVC en los “Terreros Activos Lixiviables”. Los residuos son almacenados dentro de las instalaciones de la minera en depósitos llamados “Terreros Inactivos Lixiviables” (539 Ha.).

**Jales:** Compuestos por minerales de ganga y sulfuros de Cu residuales, además de los reactivos utilizados en el proceso de flotación. Estos residuos

contienen 50% de sólidos y 50% de agua (la cual puede ser recuperada y aprovechada en el proceso de flotación).

Los jales antiguos en la zona norte de Cananea (de la cancha de béisbol y de los talleres) y los sedimentos del Arroyo El Barrilito han sido estudiados con una perspectiva de valorización por el autor Alvirde Meléndez (2024), quien identificó que el Cu y el Mo se encuentran en concentraciones atractivas para su recuperación, con valores mayores a 1% en algunos puntos en los residuos y a lo largo del arroyo. Así mismo, realizó una recuperación del cobre en columnas con una solución ácida de ácido sulfúrico, con la cual, determinó una recuperación de cobre en los jales del 64% y del 49% en los sedimentos del sitio. Estos resultados indican que el reprocesamiento de Cu en los jales antiguos es viable y se estima que el volumen de jales en el sitio es de 884, 339.8 m<sup>3</sup> en un área de 225.6 hectáreas. Esta investigación resulta en un gran paso hacia la remediación ambiental de la zona de estudio y al mismo tiempo, es una medida para el manejo circular de los residuos.

Debido a la necesidad de tomar acciones que permitan eliminar los posibles actuales y futuros impactos ambientales generados por actividades de explotación y procesamiento de Cu llevadas a cabo décadas atrás, este estudio se enfoca en caracterizar los jales históricos que se encuentran en la zona, con el objetivo de entender desde residuos antiguos el potencial de reciclaje o reúso hacia una remediación ambiental. Sin embargo, este enfoque, podría llevar a la incorporación de etapas de beneficio en las operaciones minero-metalúrgicas que permitan un mejor aprovechamiento de los recursos, siendo otros elementos, fuentes secundarias de recursos, a pesar de que el Cu “pague las cuentas” siendo el recurso primario.

## 3.2 MATEHUALA, SAN LUIS POTOSÍ

### 3.2.1 UBICACIÓN Y CONTEXTO GEOGRÁFICO

El sitio de estudio se encuentra al noreste del municipio de Matehuala, que forma parte del Estado de San Luis Potosí, ubicado en el centro-este de la República Mexicana (FIG. 19). Matehuala colinda con los municipios de Villa de la Paz, Cedral y el Estado de Nuevo León al norte; al sur, con Nuevo León y el municipio de Villa de Guadalupe; al este únicamente con Nuevo León; y al oeste con los municipios Villa de la Paz y Villa de Guadalupe. Se encuentra en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental y en la subprovincia de Sierras y Llanuras Occidentales. Tiene un clima mayormente seco y en menor medida seco templado. Su hidrografía se compone por casi en su totalidad por la cuenca Matehuala y cuenta con corrientes de agua intermitentes como lo son: El mimbre, Jaquis, Jordán, El Astillero y La Sal (INEGI, 2010).

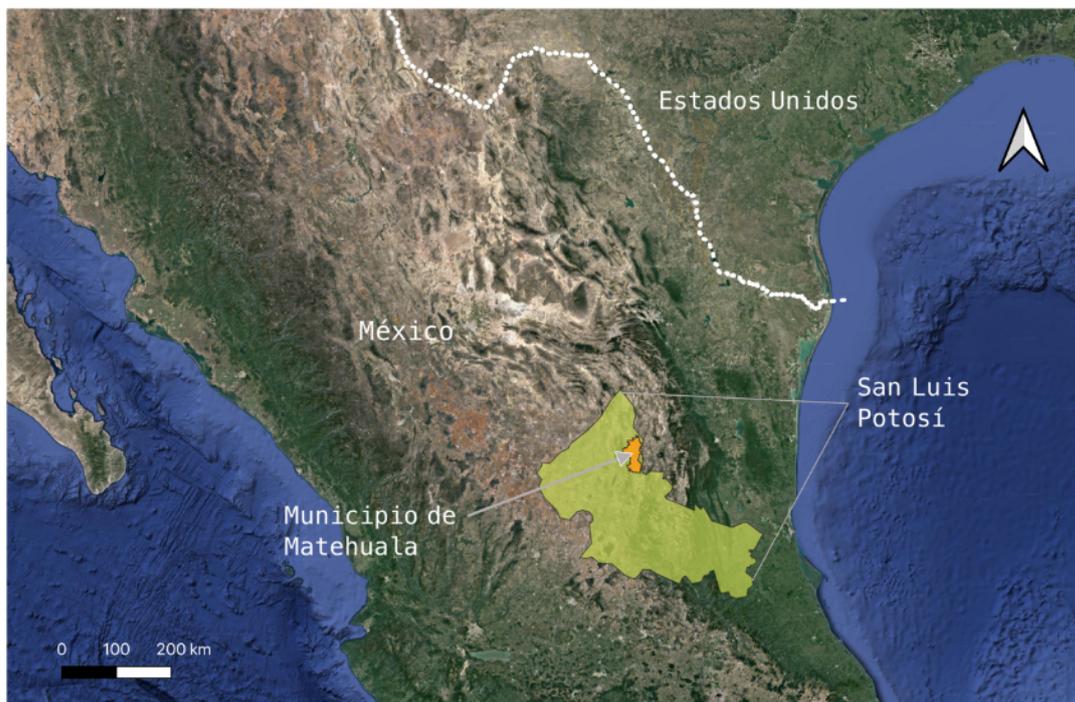


FIG. 19 LOCALIZACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO, MATEHUALA, SAN LUIS POTOSÍ.

---

### 3.2.2 CONTEXTO GEOLÓGICO Y MINERO DE SAN LUIS POTOSÍ Y MATEHUALA

---

El Estado de San Luis Potosí tiene una historia en la minería que se remonta al siglo XVI. En la actualidad, es el estado con mayor producción nacional de fluorita, además, produce agregados pétreos, arena, caliza y yeso; en cuanto a la producción de metálicos, produce casi la mitad del cadmio en México, y en menor manera produce cobre, zinc, oro, plata y plomo (Servicio Geológico Mexicano, 2021).

Matehuala es un municipio se ubica al noreste del Estado (FIG. 19) y se encuentra a 8 km del distrito minero Villa de la Paz o Santa María de la Paz, en el cual se explota Au, Ag, Pb, Cu y Cd (Servicio Geológico Mexicano, 2021).

El distrito minero de Santa María de la paz se encuentra al este del municipio de Matehuala, en el margen oeste de la Sierra Madre Oriental, en una pequeña cadena montañosa conocida como El Fraile. En esta zona, se presentan dos diferentes tipos de mineralización, uno de ellos es Pb-Zn-Ag alojado en vetas hidrotermales y otro de tipo skarn Cu-Au (Castro-Larragoitia et al., 1997). Los diferentes tipos de mineralización se presentan separados por una falla, la Falla Dolores (considerada parte del sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende), que separa la zona oeste de skarn de Au-Cu y el sistema al este de Ag-Pb-Zn al este (Pinto-Linares et al., 2008).

Los depósitos minerales de la región fueron descubiertos a finales del siglo XVIII. La primera mina en operación fue la Dolores. Para el año 1992 la producción del distrito era de 300, 000 toneladas métricas con leyes promedio de 1.3 g/t de Au, 150 g/t de Ag, 09% de Cu, 1.8% de Zn y 1.1% de Pb (Gunnesch et al., 1994). Sin embargo, en la actualidad, las actividades de explotación en la zona están a cargo de Negociaciones Mineras Santa María de la Paz y Anexas (NEMISA).

Los depósitos polimetálicos de La Paz están contenidos en rocas sedimentarias, predominantemente calizas formadas en el Jurásico-Cretácico (Gunnesch et al., 1994) subyacidas por rocas posiblemente del Paleozoico. La mineralización ocurre debido a intrusiones dioríticas y granodioríticas con edades U-Pb en zircones de aproximadamente 37 m.a. en un entorno de arco continental post-laramídico en condiciones someras y con un rápido enfriamiento (Siesgesmund et al., 2018); las

cuales, dieron origen a un skarn Au-Cu, entre ellas y las secuencias sedimentarias. Se han determinado edades de cristalización por U-Pb de 37.5-35 M.a. en las dioritas y granodioritas que parecen ser predominantemente metaluminosos a peraluminoso, con alta composición K-calcialcalinos (Siesgesmund et al., 2018). Se piensa que fallas profundas permitieron el ascenso de dicho magma a la superficie y de la misma forma, de los metales que dan origen a los depósitos (Pinto-Linares et al., 2008).

La mineralización se encuentra en lentes irregulares discordantes a la estratigrafía, los cuales, sugieren fuertes controles estructurales. Los cuerpos mineralizados se presentan como mantos, chimeneas o pods, que se presentan en sulfuros con Pb, Ag, Au y Cu; o en skarn calci-silicatado (Megaw et al., 1988), los minerales de ganga son principalmente la calcita, el cuarzo y la fluorita (García Gutiérrez, 1967).

El control estratigráfico y litológico predominante que dicta la distribución del skarn que se ve reflejada en la mineralización en las tres unidades a mayor profundidad de las calizas. Estructuralmente se tiene la falla normal Dolores y una serie de anticlinales N-S. La falla se generó después de la intrusión de los stocks y de la mineralización en el Terciario. La presencia de fallas E-W con un echado de 70° controlaron la intrusión de diques, la mayoría de la mineralización económica de Ag-Pb-Zn se encuentra en vetas cerca o en estas fallas (Gunnesch et al., 1994).

---

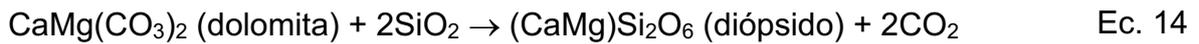
### 3.2.3 YACIMIENTOS TIPO SKARN Y SUS SUBPRODUCTOS

---

#### **¿Qué son y cómo se forman los skarns?**

Los depósitos de skarn han sido explotados por una gran variedad de elementos, tales como: Fe, W, Cu, Pb, Zn, Mo, Ag, Au, U, REE, F, B y Sn.

Los skarns consisten en rocas calcosilicatadas formadas por el reemplazo de rocas carbonatas durante un metamorfismo regional o por procesos metasomáticos de contacto relacionados a intrusiones. En algunas ocasiones están asociados a sistemas de pórfidos. El reemplazamiento de las rocas carbonatadas es generado por silicatos (Ec. 14 y Ec. 15) (Pirajno, 2010).



Los skarns se desarrollan en el contacto entre el plutón y las rocas encajonantes, por lo que se muestra un tipo zoneamiento que sale del plutón (Pirajno, 2010). Existe una gran variedad de depósitos relacionados a este fenómeno, no obstante, los metales encontrados en cada uno de los depósitos minerales son influenciados por la composición, estado de oxidación, y la afinidad metalogénica del intrusivo (Robb, 2015) y por la naturaleza de la roca encajonante.

Por otro lado, las diferencias en la composición de las intrusiones que dan origen a los skarns, están estrechamente ligadas a las regiones donde se generan los magmas. Los ambientes tectónicos que propician su formación abarcan desde la subducción oceánica (producen skarns de Fe vinculados a magmas gabroicos a dioríticos) hasta la subducción continental (generan skarns de Cu, Mo y W asociados a granitoides, monzonitas de cuarzo, granodioritas y granitos), así como la extensión continental (donde surgen skarns de Sn vinculados a granitos no orogénicos). Cabe mencionar, que la mayoría de los de importancia económica son relativamente jóvenes relacionados a la actividad magmática-hidrotermal en cinturones orogénicos (Misra, 2000).

Se han establecido diversas clasificaciones que permiten la identificación de los distintos tipos de skarns. Estos tipos se pueden categorizar de la siguiente manera: en función de los metales de interés predominantes, como Fe, Cu, Mo, Au, W, Sn, Pb-Zn (Misra, 2000); en relación con la composición de la roca encajonante, ya sea cálcica o magnesiana, lo que depende si la roca es caliza ( $\text{CaCO}_3$ ) o dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ); además, se pueden clasificar como endoskarns o exoskarns, según si el proceso metasomático ocurre dentro o fuera del plutón. Es importante destacar que la mayoría de los skarns económicamente atractivos están vinculados a exoskarns cálcicos (Robb, 2015).

Aunque hay grandes diferencias entre las asociaciones de los metales en los skarns el proceso de formación es el mismo, con un emplazamiento de un cuerpo ígneo y actividad magmática- hidrotermal llevada a cabo en diferentes niveles de la corteza. Un metamorfismo de contacto en las etapas tempranas del emplazamiento del plutón y cristalización seguida de un metasomatismo y alteración durante la saturación de fluidos magmáticos y finalmente la interacción con aguas meteóricas durante el enfriamiento del plutón. Para poder comprender los procesos en los que se lleva a cabo la formación de este tipo de depósitos, se presentan tres formas secuenciales (Robb, 2015) (FIG. 20).

**Progrado metamorfismo de contacto (alteración isoquímica):**

Cuando la intrusión entra en contacto con la roca sedimentaria, se origina un metamorfismo influenciado por el efecto térmico. Durante este proceso, los fluidos circulan y se generan como resultado de las reacciones metamórficas. En las unidades de dolomita, se observa una zonación mineral que comprende granate, clinopiroxeno, tremolita y talco o flogopita, con distancias cada vez mayores y progresivamente más cambios en la composición de los minerales relacionados con la presencia de agua. En las unidades de caliza, esta zonación se presenta con minerales como granate, vesuvianita, wollastonita y mármoles.

**Progrado (metasomatismo y reemplazamiento):**

Cuando el H<sub>2</sub>O y la saturación de vapor entran en contacto con el halo metamórfico, el metasomatismo mineral será muy similar al contacto inicial, pero la alteración será más extensa y afectará granos más grandes, reemplazando las estructuras previamente formadas. Los elementos Si, Al y Fe serán introducidos por los fluidos magmáticos, mientras que el Ca, Mg y CO<sub>2</sub> provendrán de fuentes locales. En esta etapa, no se produce la precipitación de sulfuros.

**Retrógrado (entrada de fluidos meteóricos y precipitación mineral):**

A medida que el enfriamiento ocurre con el tiempo, y debido a la interacción con aguas meteóricas, comienzan a ocurrir complejas reacciones, junto con la

precipitación de metales relacionados con la mineralización de sulfuros. Esta alteración afecta tanto a los minerales metamórficos como a los metasomáticos. En esta etapa, se puede observar la formación de minerales como epidota, biotita, clorita, plagioclasa, calcita, cuarzo, tremolita-actinolita, talco (después de los piroxenos) y serpentina (después del olivino). Los sulfuros, la magnetita y la hematita se presentan en forma de minerales diseminados o vetillas. Los conjuntos de minerales pirita-calcopirita-magnetita tienden a estar más próximos al plutón, mientras que los de esfalerita-galena son más distales. La precipitación de estos minerales se debe a factores como la disminución de la temperatura, la disminución de la solubilidad, la mezcla de fluidos, el aumento del pH y la mezcla con aguas meteóricas, lo que facilita las reacciones redox.

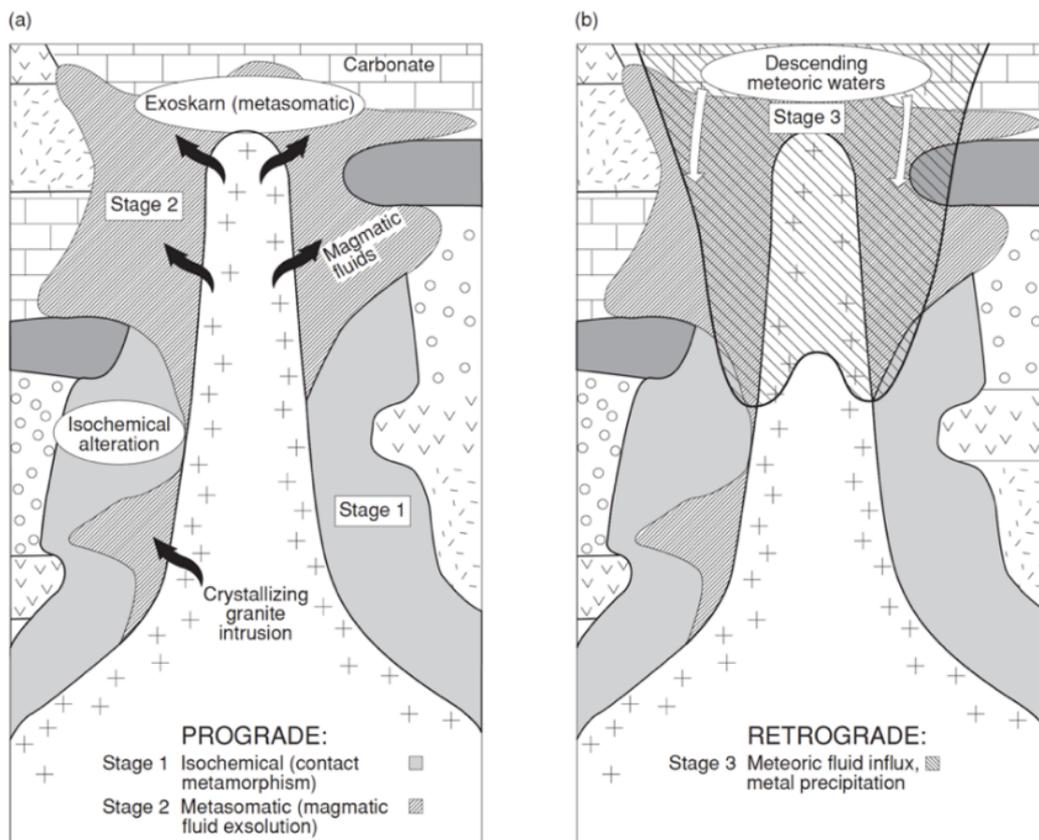


FIG. 20 EVOLUCIÓN DE LAS INTRUSIONES DE SKARN EN SUS 3 FORMAS SECUENCIALES A) ETAPAS PROGRADO Y B) ETAPA RETRÓGRADO. TOMADO DE ROBB (2015).

### Subproductos de los skarns

Debido a la amplia diversidad de características que pueden presentarse en distintos depósitos de skarn, se observa igualmente una variabilidad de elementos que pueden

resultar económicamente atractivos. En algunos casos, los skarns son polimetálicos, lo que significa que es necesario recuperar varios metales simultáneamente para que la explotación de los depósitos sea económicamente viable (Meinert et al., 2005). En otros casos, un mismo metal puede ser la mena principal en un yacimiento mineral, en cambio, en otro yacimiento puede estar presente y ser recuperado como subproducto, tal es el caso de Au (Theodore et al., 1930), entre otros metales.

Un ejemplo ilustrativo de la diversidad de elementos asociados en yacimientos polimetálicos es el skarn Yaojialing de Zn, que se considera un depósito polimetálico y se explota por sus contenidos de Zn, Au y Cu. Sin embargo, también se han identificado concentraciones significativas de otros elementos como el Cd, que se encuentra incorporado en la esfalerita en vetas, con un promedio de 5478.78 ppm; el Co, que se halla en la pirita y la esfalerita con un promedio de 1962.18 ppm; el Se, presente en la calcopirita y la esfalerita, con una mayor concentración en la esfalerita, alcanzando un promedio de 226.8 ppm; y el Te, que se forma en la mena de Cu-Zn en los sulfuros. Estas concentraciones evidencian la diversidad de metales presentes en este yacimiento polimetálico (Xiong et al., 2022). Otro ejemplo, es el distrito minero de Pitkäranta, Rusia en los que se tiene skarns de Sn y Zn, en los cuales, también se han encontrado concentraciones importantes de In, Bi, Be, Te, and Se (Ivashchenko, 2021). El In, específicamente, se ha reportado como subproducto de los skarns dado a su relación con la esfalerita, permitiendo evaluar su posible recuperación en los concentrados del sulfuro (Mongoljiibuu, 2022; Xu, et al., 2020).

Por otro lado, algunos depósitos de este tipo han revelado concentraciones significativas de REE. La mineralogía desempeña un papel crucial en este aspecto, ya que aquellos que presentan enriquecimientos notables incluyen minerales como granates, vesuvianita, epidota y alanita. En depósitos de skarn asociados con Au y Zn, se han detectado contenidos de REE de hasta un 20%, (Ce>La>Pr>Nd) presentes principalmente en la vesuvianita y la epidota (Gemmell et al., 1992) en (Meinert, 1992). Un ejemplo de este enriquecimiento es el depósito de skarn Mary Kathleen en Queensland, Australia. En este yacimiento, los REE y U se encuentran en inclusiones fluidas como minerales secundarios, siendo el Ce, Nd y La, algunos de los REE presentes en los granates. Los granates muestran concentraciones de REE de hasta

7600 ppm y de U de 5 a 2700 ppm. Además, se ha determinado que estos elementos pueden estar concentrados en fluidos hidrotermales de alta temperatura en este depósito mineral (Kwak y Abeysinghe, 2018). Otro ejemplo relacionado a las REE es el skarn de Fe Riddarhyttan de Suecia, el cual se ha identificado como fuente de REE (Ce y La), siendo los minerales del grupo de la epidota los que contienen a dichos elementos (Holtstam et al., 2014).

---

### 3.2.4 RESIDUOS DE MATEHUALA

---

#### **Situación ambiental relacionada con las actividades minero-metalúrgicas**

El impacto ambiental de la zona de influencia de las actividades minero-metalúrgicas de Villa de la Paz y Matehuala (FIG. 21) se ha estudiado a profundidad y se han detectado concentraciones de EPTs en suelos y agua de la región, tal como lo presentan los autores (Razo et al., 2004) que detectaron un área de 105 km<sup>2</sup> afectada, dado a concentraciones de EPTs en el suelo de 19-17 384 ppm de As, 15-7200 ppm de Cu, 31-3450 ppm de Pb y 26-6270 ppm de Zn; en sedimentos secos de arroyo 29-28 600 ppm de As, 50-2160 ppm de Pb, 71-2190 ppm de Cu y 98-5940 ppm de Zn; y de As en agua de almacenamiento pluvial  $265 \frac{\mu g}{L}$  y en el área de Cerrito Blanco  $5900 \frac{\mu g}{L}$ , el cual es un sitio recreacional.

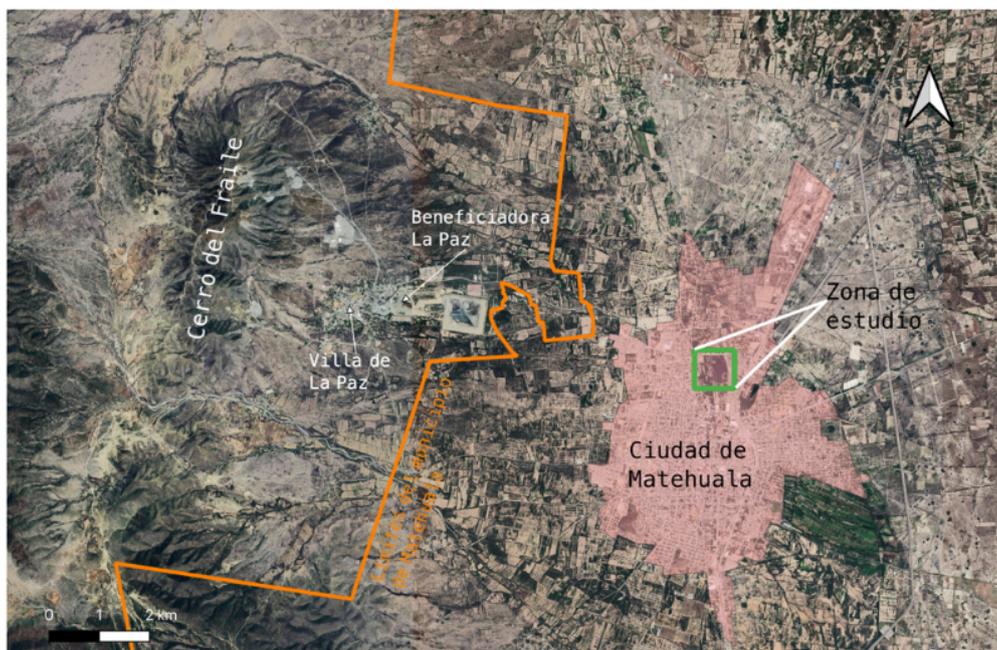


FIG. 21 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO EN CONTEXTO REGIONAL.

La fuente de contaminación se ha podido identificar, siendo los depósitos de jales activos y abandonados del distrito Villa de la Paz y las escorias de la antigua fundición de Matehuala (Razo et al., 2004; Castro-Larragoitia et al., 1997; Manz y Castro, 1997; Martínez-Villegas et al., 2013). Debido al clima semi-seco, la dispersión de los metales desde la fuente de contaminación es llevada a cabo por fenómenos eólicos e hídricos (Castro-Larragoitia et al., 1997; Rodríguez-Hernández et al., 2021), siguiendo una dirección W-E dada por las corrientes y SW-NE, por ello, los factores que determinan la diseminación de los metales son: la geomorfología, el clima y la naturaleza mineral del yacimiento (Razo et al., 2004).

Los mecanismos químicos que inducen la liberación de elementos potencialmente tóxicos en la región incluyen: la oxidación de los sulfuros y su redistribución en minerales secundarios, la disolución reductiva de óxidos y arseniatos, y la disolución ácida de fases carbonatadas secundarias. Además, es importante destacar que parte del As, Cd y Pb se encuentran en forma de sulfuros, lo que podría plantear un riesgo potencial futuro debido a su liberación por la intemperie (Rodríguez-Hernández et al., 2021). Se ha podido conocer que la disolución de arseniatos cálcicos presentes en las escorias inactivas ha provocado contaminación por As en el acuífero permeable alcanzando hasta 158 mg/L de As disuelto y liberando un total de 7.5 t de As por año. Además, se observa que la precipitación de arseniatos cálcicos controla la movilidad del As, esto se debe a los sedimentos y suelos calcáreos que se tienen en la zona (Martínez-Villegas et al., 2013).

A su vez, la caracterización mineralógica de los suelos destaca la presencia predominante de minerales como calcita, yeso y cuarzo. No obstante, Hernández Bárcenas (2017) identificó minerales de arsénico, tales como farmacosiderita  $KFe_4(AsO_4)_3(OH)$ , bukovskyita  $Fe_2(AsO_2)(SO_2)(OH) \cdot 9H_2O$ , escorodita  $FeAsO_4 \cdot 2H_2O$ , beudantita  $PbFe_3(OH)_6SO_4AsO_4$ , clinoclasa  $Cu_3AsO_4(OH)_3$ , arseniato de sodio  $Na_3AsO_4$ , adamita  $Zn_2AsO_4OH$ , arsenolita  $As_2O_3$ , oropimente  $As_2S_3$ , así como la presencia de arseniatos de calcio como la guerinita  $Ca_5H_2(AsO_4)_4 \cdot 9H_2O$ , haidingerita  $CaHAsO_4 \cdot H_2O$  y farmacolita  $CaHAsO_4 \cdot 2H_2O$ . Además, observó arsénico absorbido en la ferrihidrita  $As \equiv Fe(OH)_3$ .

Por otro lado, diversos estudios han concluido que la contaminación causada por Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs) también ha tenido un impacto negativo en la flora y fauna de la región. Los autores Castro-Larragoitia, Kramar y Puchelt (1997) estudiaron zonas de agricultura en el área de influencia de las actividades mineras, lo que les permitió determinar que en las hojas del maíz se acumula el As, encontrando hasta 20 ppm. Asimismo, un estudio realizado por Espinosa-Reyes et al. (2014) identificó la presencia de arsénico y plomo en las raíces de las plantas, así como en los riñones e hígados de los roedores silvestres. Estos hallazgos resaltan que las áreas cercanas al distrito minero de Villa de la Paz exhibieron una menor diversidad biológica en términos de plantas y roedores.

Adicionalmente, se ha detectado la presencia de plomo (Pb) en la sangre de aves de la región, mostrando concentraciones que indican desde una baja hasta una alta intoxicación que podría afectar sus funciones fisiológicas (Chapa et al., 2010). Siendo analizado el impacto en las comunidades bióticas se pone en manifiesto la relevancia de tomarlas en cuenta como parte de la evaluación de sitios contaminados (Espinosa-Reyes et al., 2014).

En conclusión, la presencia significativa de metales en suelos, agua y biota, así como su dispersión y comportamiento químico, ha permitido identificar claramente las fuentes de contaminación. Esto subraya la necesidad de emprender acciones para mitigar los impactos actuales y prevenir futuras repercusiones, como han propuesto varios estudios, incluyendo Castro-Larragoitia et al. (1997), quienes sugieren cubrir los jales para evitar la dispersión eólica, Manz y Castro (1997) que recomiendan la encapsulación de las escorias y la instalación de un sistema de drenaje para recolectar el agua contaminada y evitar su dispersión, y Razo et al. (2004) quienes proponen medidas para controlar la dispersión eólica de las partículas, evitar la erosión en áreas de embalses desviando los cursos de agua y remediar los suelos y sedimentos más contaminados.

### **Tipos de Residuos**

**Escorias:** Al norte del municipio de Matehuala, se encuentran los restos de la antigua fundidora de plomo de Matehuala de la empresa “American Smelting and

Refining Company” (ASARCO) que estuvo en operación desde 1905 hasta 1965. Durante este largo período, no existían regulaciones ambientales que supervisaran la disposición de los residuos generados por las actividades metalúrgicas. A lo largo de seis décadas, se generaron grandes cantidades de escorias vítreas (silicatadas) de color gris a negro, producto de las seis décadas del proceso metalúrgico de fundición del Pb. Estas escorias cubren un área de aproximadamente 15 hectáreas y tienen una altura que ronda los 20 metros (FIG. 22, FIG. 23). Aunque su apariencia sugiere estabilidad tanto física como química, es crucial examinar su composición y la presencia de EPTs, con el fin de determinar si representan algún riesgo para los habitantes locales o al ambiente.

El sitio, rodeado de zonas residenciales debido al crecimiento urbano, genera preocupaciones sobre posibles peligros. Algunos residentes han utilizado el material de las escorias para construir casas (FIG. 24).

**Suelos contaminados con polvos de fundición:** En la actualidad, lo que persiste de la antigua fundidora son los escombros del edificio, los cuales, están ubicados en un sitio al oeste de la pila de Escorias. Además de los remanentes del edificio, el área presenta suelos enriquecidos de As que fueron contaminados por polvos que se liberaron sin control alguno en el proceso pirometalúrgico (FIG. 22, FIG. 23).



FIG. 22 INSTALACIONES DE EX FUNDIDORA (IZO.) RESIDUOS PROVENIENTES DE LA EX FUNDIDORA (DER.).

**Jales:** Este sitio se caracteriza por presentar mineralización de Pb-Zn-Ag (Cu-Au) que ha sido minado por más de 150 años. Resultando en una gran generación de residuos, los autores Razo et al. (2004) han determinado que en la zona por lo menos cinco depósitos de jales en Villa de la Paz y sus alrededores.



FIG. 23 UBICACIÓN DE RESTOS DE EX FUNDICIÓN Y SUELOS CONTAMINADOS POR POLVOS DE FUNDICIÓN (IZQ.) Y PILA DE ESCORIAS (DER.) EN MATEHUALA, SAN LUIS POTOSÍ.



FIG. 24 ESCORIAS UTILIZADAS COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN EN ZONAS HABITACIONALES ALEDAÑAS.

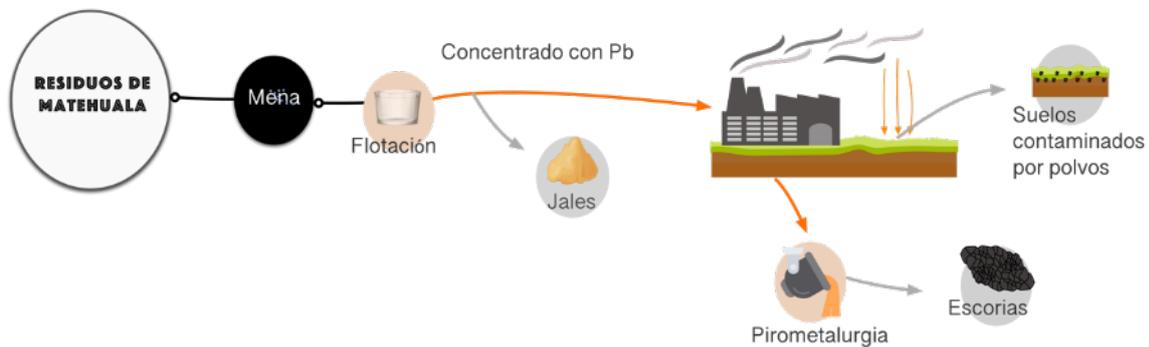


FIG. 25 DIAGRAMA E EL QUE SE MUESTRAN LOS TIPOS DE RESIDUOS PRESENTES EN LA ZONA DE ESTUDIO DE MATEHUALA, SAN LUIS POTOSÍ Y SUS ALREDEDORES.

Debido a la situación actual ambiental de la zona de estudio, el entendimiento de que los residuos presentes en el municipio de Matehuala son una de las fuentes de contaminación anteriormente estudiada en la región y el hecho de que este sitio necesita medidas para eliminar la fuente de contaminación. En esta investigación nos enfocaremos en los residuos de escorias dentro de Matehuala y en los suelos contaminados por los polvos de la fundidora, con el objetivo de analizar su potencial de ser reciclados o de ser usados como materia prima, esto, como un primer paso hacia una remediación ambiental.

## 4. METODOLOGÍA Y EXPERIMENTACIÓN

---

### 4.1 PROPUESTA DE MODELO DE MANEJO DE RESIDUOS PARA LA MINERÍA BASADO EN LA ECONOMÍA CIRCULAR

---

Se realizó una investigación y análisis teórico, de modelos existentes de EC enfocados a la minería. Se consideraron las diferentes etapas mineras y de manejo de residuos minero-metalúrgicos. Tomando en cuenta los siguientes aspectos:

1. Los aspectos técnicos de la caracterización física, química y mineralógica de los residuos para las etapas tempranas del modelo (la determinación de potencial de valorización, incluido el muestreo representativo con una visión económica-ambiental). Es importante mencionar que esta primera etapa, únicamente se evalúa un potencial de valorización, sostenida por las siguientes etapas.
2. Para las etapas medias (prefactibilidad y factibilidad) se consideraron aspectos técnicos para los posibles procesos metalúrgicos o de reúso de los materiales. Estas etapas son en las que se determina la factibilidad de valorización. Es relevante mencionar que no se especifica una metodología económica para determinar la rentabilidad de la valorización, únicamente se menciona la necesidad de tomar en cuenta dicho aspecto.
3. En las etapas tardías, el objetivo es mantener el equilibrio natural de los sistemas, por lo que la determinación de la peligrosidad y, por lo tanto, la estabilización de los residuos fue planteada para el mantener dicho balance. Junto con ello se buscó integrar al medio ambiente los materiales de un modo que un posible impacto ambiental sea reducido o eliminado.
4. Con el objetivo de integrar las tres etapas propuestas en un ciclo cerrado o circular se consideraron sistemas naturales en equilibrio, especialmente, el ciclo de las rocas para tomar de referencia sistemas en los que no se generan residuos y cada producto es incorporado nuevamente al sistema.

## 4.2 PROPUESTA DE CLASIFICACIÓN DE ELEMENTOS/MATERIALES ESTRATÉGICOS PARA MÉXICO

---

Para hacer una propuesta de minerales estratégicos para México realizó una revisión teórica y análisis cualitativo que permitió identificar aquellos materiales minerales que sean necesarios para el desarrollo económico actual y que representen un punto de partida para la discusión y fortalecimiento de ésta. La revisión teórica fue desarrollada en dos estrategias, para las cuales se plantearon y se examinaron los siguientes aspectos: materiales de estrategia interna, materiales de estrategia externa y materiales de estrategia externa e interna.

### 1. Aspectos Internos

Economía de México y actividades esenciales

- Actividades que participan en el Producto Interno Bruto (PIB) total
- PIB por actividad de la industria manufacturera
- Balanza comercial (importaciones y exportaciones)
- Producción minera, importancia y participación mundial

### 2. Aspectos externos

- Tratados comerciales de México
- Minerales críticos en Norte América
- Estabilidad política de los países productores de minerales

Con esta revisión y análisis se buscó proponer aspectos que permitan en desarrollo y mejora no solo de la lista propuesta, sino del sector minero y la colaboración entre los diferentes sectores involucrados.

#### 4.3 POTENCIAL DE VALORIZACIÓN (CASOS DE ESTUDIO)

De acuerdo con el modelo de Economía Circular propuesto, se evaluó el potencial de valorización de los residuos antiguos de actividades minero-metalúrgicas correspondientes en cada sitio de estudio. Siguiendo de manera general los siguientes pasos:

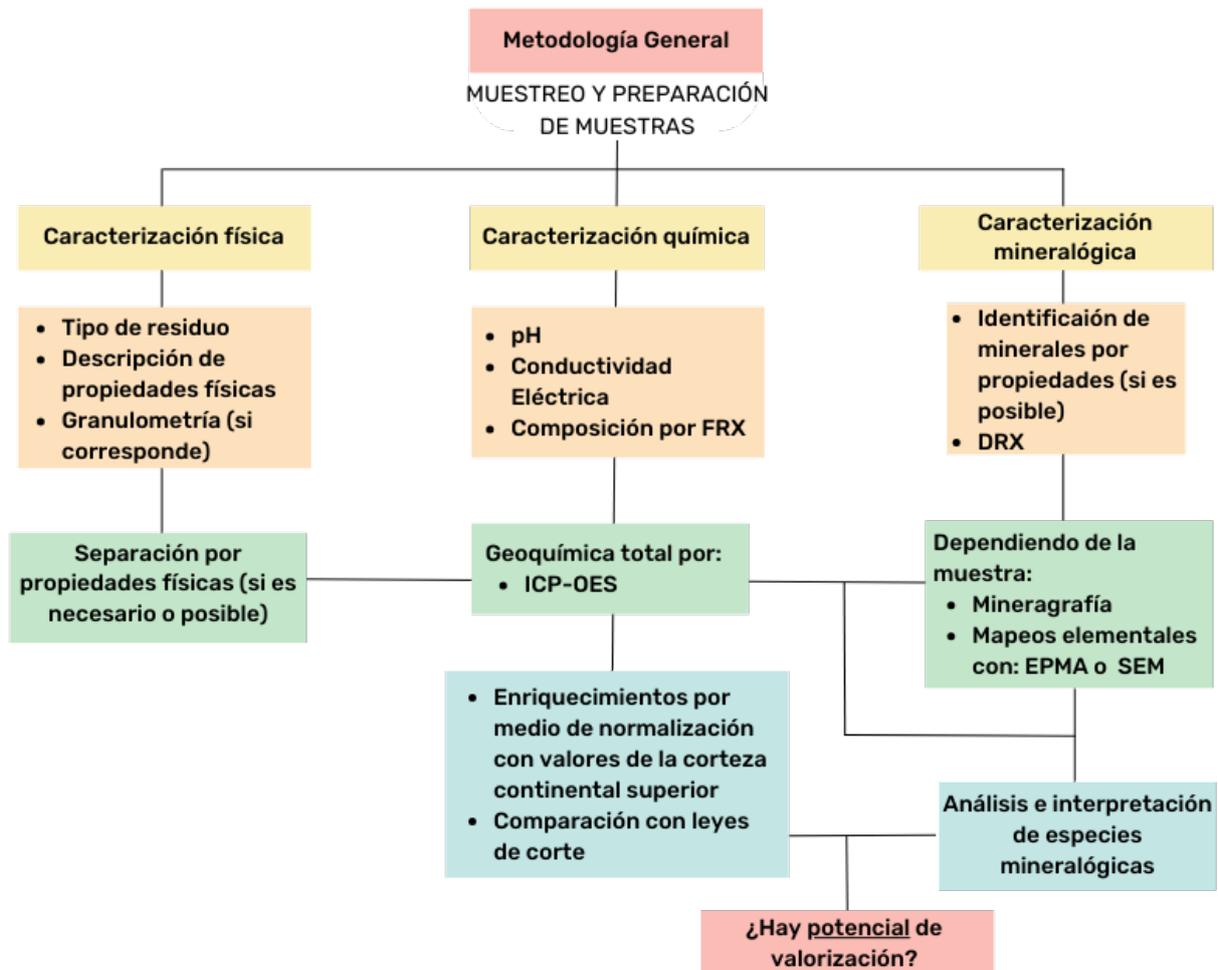


FIG. 26 METODOLOGÍA GENERAL PARA EVALUAR EL POTENCIAL DE VALORIZACIÓN DE LOS RESIDUOS ESTUDIADOS EN CADA SITIO.

El muestreo se llevó a cabo tanto de manera superficial como a profundidad para cada tipo de muestra. La preparación de las muestras se realizó en el laboratorio y se explicará en la metodología para cada sitio más adelante.

La caracterización de cada residuo o material para determinar su potencial de valorización se basó en el análisis de sus características físicas, químicas y mineralógicas (FIG. 26). La caracterización física depende en gran medida del tipo de residuo en estudio, por lo que se realizaron descripciones cualitativas de todos ellos y se llevó a cabo la separación granulométrica de algunos. La caracterización química permitió identificar la presencia de elementos en concentraciones atractivas desde el punto de vista económico, evaluando su enriquecimiento según los valores de los elementos en la corteza continental superior y las leyes de corte de las minas o proyectos mineros activos. Por último, la caracterización mineralógica se realizó de manera general utilizando la técnica de DRX como guía, y de acuerdo con el tipo de material, se seleccionaron técnicas alternativas que permitieran una mejor caracterización.

Finalmente, se analizaron los resultados de cada una de las caracterizaciones y se determinó el potencial de valorización de los residuos o materiales estudiados.

#### 4.3.1 CANANEA, SONORA

De manera particular, para los jales históricos de Cananea, Sonora, se realizaron separaciones granulométricas y se realizaron mapeos elementales con EPMA debido a las características del material.

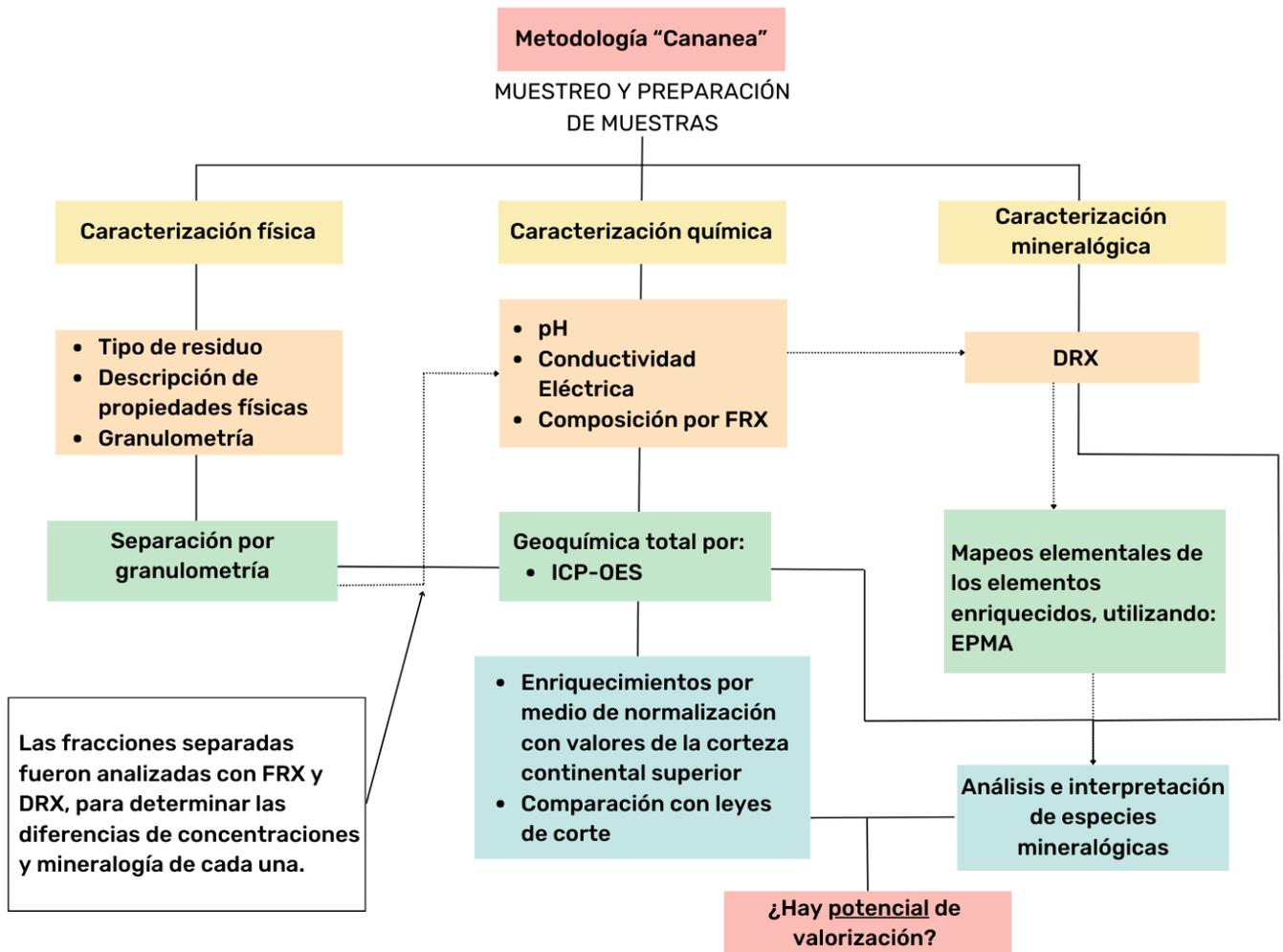


FIG. 27 METODOLOGÍA PARTICULAR PARA LOS RESIDUOS DE CANANEA, SONORA (JALES HISTÓRICOS AL NORTE DE LAS ACTIVIDADES DE EXPLOTACIÓN).

### Muestreo

Se realizó una campaña de muestreo en el área de los jales históricos en los residuos históricos norte, dirigida del 5 de octubre del 2020 al 12 de octubre del 2022 en el que se tomaron 56 muestras (FIG. 28) de jales antiguos superficiales (FIG. 30) y en zanjas de una profundidad de hasta 250 cm (FIG. 29). Los sitios muestreados fueron seleccionados de acuerdo con la heterogeneidad del material, considerando el color, textura, grado de concreción y el pH medido en campo.



FIG. 28 MUESTREO DEL CONTROL HIDROLÓGICO NORTE EN CANANEA, SONORA.



FIG. 29 MUESTREO DE ZANJAS EN JALES HISTÓRICOS DE CANANEA, SONORA.



FIG. 3o ZONA DE MUESTREO SUPERFICIAL EN JALES DE LA CANCHA DE BÉISBOL.

### **Preparación de muestras**

1. Las muestras superficiales y de zanjas fueron secadas a temperatura ambiente por 24 horas.
2. Se realizó un cuarteo en el que se seleccionaron dos muestras: una que se hizo pasar por un tamiz malla 10 (para determinar el pH y la conductividad eléctrica) y otro que se separó para análisis especiales (para FRX y DRX).
3. La fase para análisis especiales se molió con un molino de anillos concéntricos (Pullverisette 9) con un accesorio de molienda de ágata.
4. Para las muestras de zanjas, después del paso 1 de la preparación de las muestras, se seleccionaron dos puntos y se prepararon dos muestras compuestas (incluyendo todas las profundidades muestreadas en cada punto) de los jales inactivos y de la cancha de béisbol, una de cada uno. Posteriormente, se llevaron a cabo los pasos 2 y 3.

### **Caracterización física**

1. Se realizó una separación por granulometría de la muestra compuesta de los jales de la cancha de béisbol. Para realizarla se pesaron 150.08 gramos de la muestra; posteriormente, se utilizaron las mallas #10, #40, #60, #100, #200 y #400 y dejaron por 2 horas en un agitador de tamiz; finalmente, se pesaron cada una de las fracciones y se describió el color y aspecto de cada una de ellas.

### **Caracterización química**

#### General

1. Para la caracterización química se tomó la fracción (malla 10) de la muestra obtenida del cuarteo y se mezcló en relación 1:5 con agua desionizada, se colocó en el agitador por 30 minutos a 180 r.p.m, pasados los 30 minutos las muestras se dejaron reposar hasta que no quedaran sólidos en suspensión. Por último, se midió el pH con un potenciómetro Denver Instrument Ultrabasic y la conductividad eléctrica con un conductímetro OAKTON, en todas las muestras. Para el control de la calidad de los resultados, se realizaron duplicados del 20% de las muestras analizadas.
2. Para el análisis de la concentración de elementos se utilizó la técnica de Fluorescencia de Rayos X (FRX), para ello, se tomó la fracción molida destinada a análisis especiales y se procedió a medir con un espectrómetro de FRX portátil Niton XL3t; se realizaron tres lecturas de 90 segundos cada una en diferentes puntos de la muestra. Los elementos analizados por esta técnica fueron: Tl, Pb, Se, As, Hg, Zn, Cu, Ni, Fe, Mn, Cr, V, Ti, Ca, K, Ba, Sb, Cd y Ag.
3. Para el análisis de la geoquímica total de las muestras, de acuerdo con los resultados obtenidos de la FRX, se seleccionaron 10 muestras de jales para ser analizadas mediante Análisis Instrumental de Activación de Neutrones (INNA) (los elementos Ag, Au, Ni, Zn, As, Ba, Br, Co, Cr, Cs, Eu, Fe, Hf, Hg, Ir, Na, Rb, Sb, Sc, Se, Ta, Tb, Th, U, W, La, Ce, Nd, Sm y Yb) y Espectroscopia de Emisión Óptica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES/MS) (los

elementos analizados fueron: Ag, Cu, Cd, Mo, Pb, Ni, Zn, S, Al, Ba, Be, Bi, Ca, Co, Cr, Cs, Hf, Ga, Ge, In, K, Li, Mg, Mn, Nb, P, Rb, Re, Se, Sn, Sr, Ta, Te, Ti, Th, Tl, V, U, Y, Zr, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Tb, Ho, Er, Tm, Yb y Lu), tras su digestión total, en los laboratorios ACTLABS de Ontario, Canadá. Según los laboratorios en donde se llevaron a cabo las mediciones el control de calidad para la digestión es del 14% para cada lote, 5 blancos de reactivo del método, 10 controles internos, 10 duplicados de muestras y 8 materiales de referencia certificados. La selección de las 10 muestras se basó en las concentraciones elevadas de cobre determinadas por FRX, con el objetivo de representar diferentes profundidades y puntos, con el fin de obtener una mayor diversidad en el comportamiento de los elementos.

4. De acuerdo con los resultados correspondientes de la geoquímica total, fueron seleccionadas las muestras de la zona de la cancha de béisbol y del vivero para conocer el enriquecimiento de los elementos en el sitio. Para ello, se utilizaron los valores de la concentración de elementos en la corteza continental superior de Rudnick y Gao (2003) y valores de fondo de la zona de estudio de Calmus et al. (2018) para normalizar las concentraciones promedio en los jales y detectar las anomalías de elementos presentes.
5. Las concentraciones promedio de elementos que mostraron enriquecimientos fueron comparadas con leyes de corte de minas activas (preferentemente cercanas) para determinar si existe un potencial de recuperación.

#### Fracciones separadas por granulometría de la muestra compuesta de la cancha de béisbol

1. Para el análisis de la concentración de elementos de cada fracción granulométrica (provenientes de las muestras compuestas de zanjas), se llevó a cabo únicamente el paso número 2 de la caracterización química general.

### **Caracterización mineralógica**

#### General

1. La caracterización mineralógica inicial se realizó con la técnica de Difracción de Rayos X (DRX) utilizando un difractómetro SIEMENS D5000 (radiación Cu  $K\alpha$ ,  $k = 1,5406 \text{ \AA}$ ) y para la interpretación de los difractogramas se utilizó el software Xpoder.

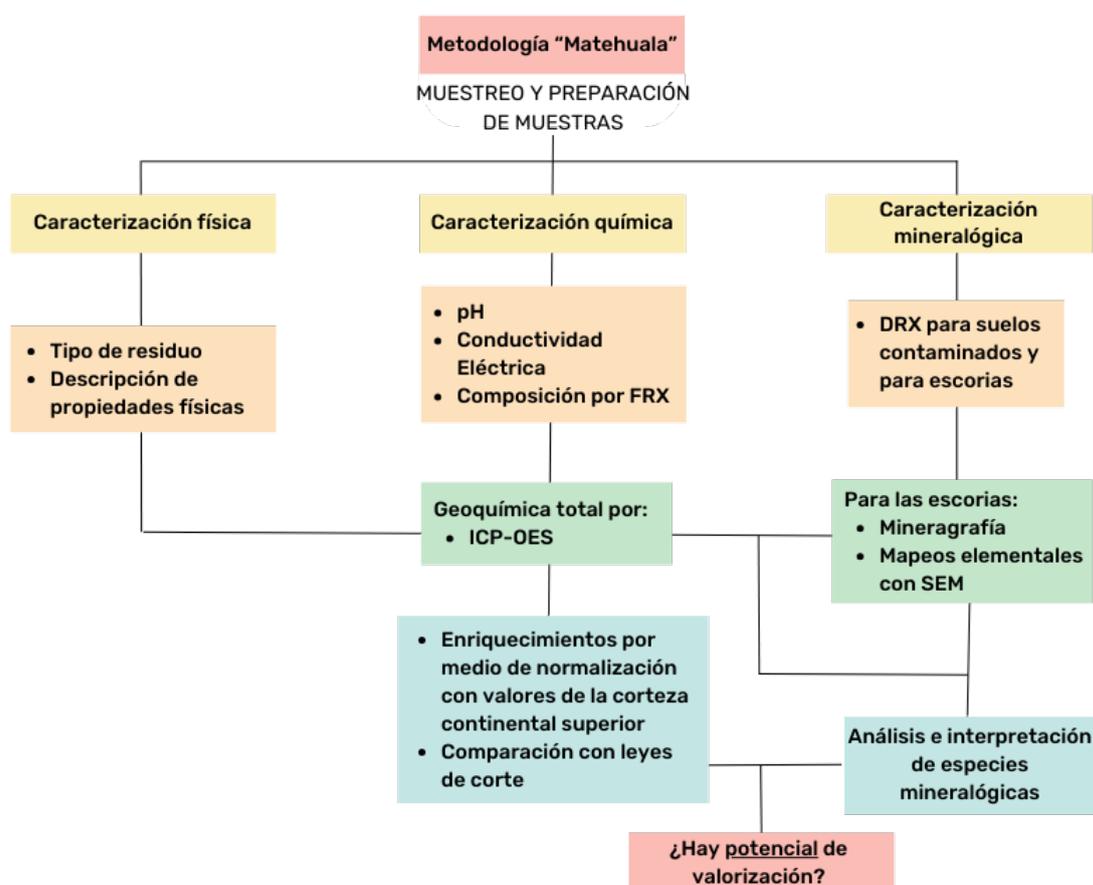
## Fracciones separadas por granulometría de la muestra compuesta de la cancha de béisbol

1. La mineralogía de estas fracciones se analizó utilizando la técnica DRX. Del mismo modo que en la caracterización general, se utilizó el software Xpowder para interpretar los difractogramas.
2. Se realizaron mapeos elementales de elementos mayores y elementos traza de interés (aquellos enriquecidos) en las fracciones retenidas en la malla #10 y la malla #400. Se llevaron a cabo en Laboratorio Universitario de Petrología (LUP-LANGEM) de Instituto de Geofísica de la UNAM, con la técnica de microsonda electrónica JEOL modelo JXA-8900R, Electron Probe Microanalyzer (EPMA). Esta técnica se utilizó para relacionar espacialmente los elementos presentes en la muestra de la fracción de jales y así, poder determinar una posible mineralogía de los elementos en estudio.

### 4.3.2 MATEHUALA, SAN LUIS POTOSÍ

Para el estudio de las escorias y de los suelos contaminados, se modificó el método general para la caracterización física y para la caracterización mineralógica. Esto, debido a las diferencias entre los materiales, ya que uno es un suelo y las escorias son un material vítreo y duro.

FIG. 31 METODOLOGÍA EMPLEADA PARA LOS RESIDUOS DE MATEHUALA, SAN LUIS POTOSÍ (ESCORIAS Y SUELOS CONTAMINADOS POR POLVOS DE EX-FUNDICIÓN).



### MUESTREO Y PREPARACIÓN DE MUESTRAS

#### Muestreo

Se llevó a cabo una campaña de muestro el día 16 de septiembre del 2022, en la que se tomaron un total de 51 muestras (FIG. 32). De las escorias se tomaron 10 muestras superficiales y 4 muestras compuestas en perfiles que iban de 4m a 10 m (FIG. 33).

De los suelos de la exfundición, fueron tomadas 39 muestras en 14 puntos seleccionados en zanjas a una profundidad de hasta 50 cm. Los sitios de muestreo fueron seleccionados de acuerdo con la extensión y accesibilidad de los dos sitios, con el objetivo de cubrir la mayor superficie posible, para lograr un muestreo representativo.

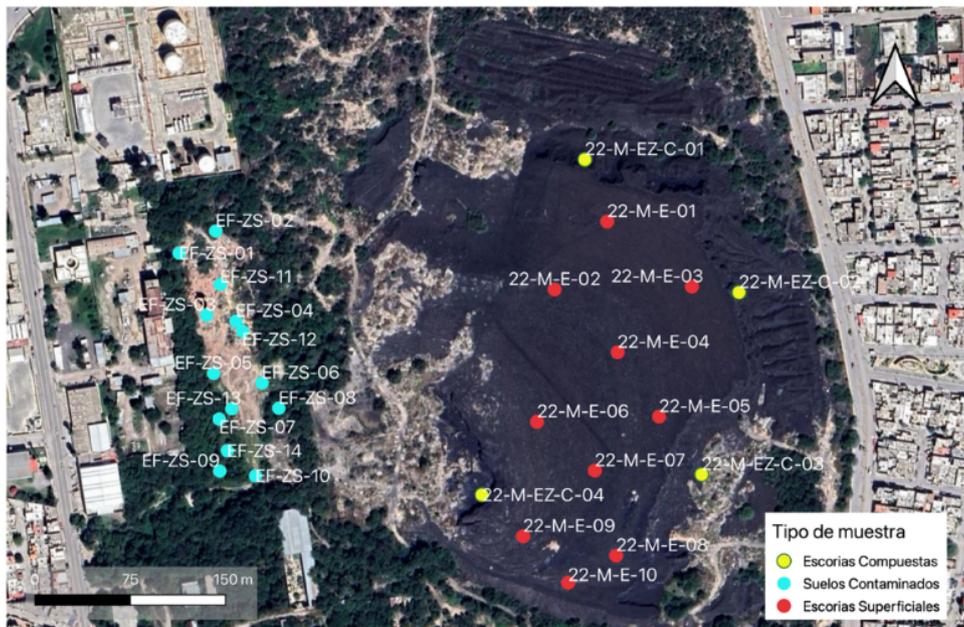


FIG. 32 MUESTREO EN MATEHUALA, SAN LUIS POTOSÍ.



FIG. 33 MUESTREO EN LAS ESCORIAS DE MATEHUALA (IZQ.) Y EN SUELOS CONTAMINADOS POR LA EXFUNDICIÓN (DER.).

## **Preparación de muestras**

1. Las muestras fueron secadas a temperatura ambiente por 24 horas.
2. Para los suelos, se removieron hojas, raíces, rocas, escorias y basura presente. Posteriormente, se realizó un cuarteo en el que se seleccionaron dos muestras: una que se hizo pasar por un tamiz malla 10 (para determinar el pH y la conductividad eléctrica) y otro que se separó para análisis especiales. Para las escorias, se trituró el material con una trituradora de mandíbula. Posteriormente, se realizó un cuarteo en el que se seleccionaron dos muestras: una que se hizo pasar por un tamiz malla 10 (para determinar el pH y la conductividad eléctrica) y otro que se separó para análisis especiales.
3. La fase para análisis especiales se molió con un molino de taza vibradora (Pullverisette 9) con un accesorio de molienda de ágata para los suelos y con un accesorio de molienda de carburo de tungsteno para las escorias (debido a la mayor dureza de la muestra).
4. Se seleccionaron 3 muestras de escorias y se montaron en resina para tener briquetas en pulido tipo espejo.

---

## TRABAJOS DE LABORATORIO

---

### **Caracterización física**

1. Tanto en suelos como en escorias se realizó una descripción de las propiedades físicas visibles para cada una de las muestras.

### **Caracterización química**

#### General

1. Para la caracterización química, se tomó la fracción (malla 10) de la muestra obtenida del cuarteo y se mezcló en relación 1:5 con agua desionizada, se colocó en el agitador por 30 minutos a 180 r.p.m. Por último, se midió el pH con un potenciómetro Denver Instrument Ultrabasic y la conductividad eléctrica con un conductímetro OAKTON, en todas las muestras. Para el control de la calidad de los resultados, se realizaron duplicados del 20% de las muestras analizadas.
2. Para el análisis de la concentración de elementos se tomó la fracción molida destinada a análisis especiales y se procedió a medir con un espectrómetro de

FRX portátil Niton XL3t; se realizaron tres lecturas de 90 segundos cada una en diferentes puntos de la muestra (los elementos analizados por esta técnica fueron: Tl, Pb, Se, As, Hg, Zn, Cu, Ni, Fe, Mn, Cr, V, Ti, Ca, K, Ba, Sb, Cd y Ag).

3. Para el análisis de la química total de las muestras, de acuerdo con los resultados obtenidos de la FRX se seleccionaron 10 muestras (5 de los suelos contaminados y 5 de las escorias) para ser analizadas mediante fusión de peróxido de sodio ICP/OES +ICP/MS en los laboratorios ACTLABS de Ontario, Canadá (los elementos analizados fueron: Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Dy, Er, Eu, Fe, Ga, Gd, Ge, Ho, Hf, In, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Nb, Nd, Ni, Pb, Pr, Rb, S, Sb, Se, Si, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Te, Th, Ti, Tl, Tm, U, V, W, Y, Yb y Zn). Para el control de calidad, según la información proporcionada por los laboratorios, las muestras se analizan con un mínimo de 10 materiales de referencia certificados para los analitos requeridos, todos preparados mediante fusión con peróxido de sodio. Cada décima muestra se prepara y analiza en duplicado; se prepara y analiza un blanco cada 30 muestras. Las muestras se analizan utilizando un ICP y se utilizan estándares internos como parte del procedimiento operativo estándar.
4. De acuerdo con los resultados obtenidos de la geoquímica total, se utilizaron los valores de la concentración de elementos en la corteza continental superior de (Rudnick y Gao, 2003) para normalizar las concentraciones promedio de los elementos en las 10 muestras y así, poder determinar posibles enriquecimientos y anomalías en cuanto a su concentración.
5. Las concentraciones promedio de elementos que mostraron enriquecimientos fueron comparadas con leyes de corte de minas activas (preferentemente cercanas) para determinar si existe un potencial de recuperación.

## **Caracterización mineralógica**

### General (suelos y escorias)

1. La caracterización mineralógica inicial se realizó en muestras seleccionadas, con la técnica DRX y para la interpretación de los difractogramas se utilizó el software Xpowder.

### Únicamente para las escorias

2. Las briquetas de escorias fueron analizadas en microscopio de luz reflejada, para encontrar puntos de interés para definir las especies mineralógicas.
3. Se realizaron mapeos elementales en diferentes puntos seleccionados en las briquetas con el uso de un Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) con un equipo Tabletop Microscope TM3030PLUS, Hitachi; el cual cuenta con un espectrómetro de energía dispersada de rayos X (EDX, por sus siglas en inglés) para los mapeos elementales en el Laboratorio de Ciencias Ambientales de la Estación Regional del Noroeste (ERNO), Instituto de Geología de la UNAM.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 LAS 4 RS Y EL MODELO DE ECONOMÍA CIRCULAR PARA LA MINERÍA

#### 5.1.1 LAS 4 RS

La necesidad de implementar acciones que permitan un manejo de residuos integral ha llevado a proponer la adición de una nueva “R” a las 3 Rs existentes (reducir, reciclar y reutilizar). La Cuarta R propuesta es la **Reintegración** a la naturaleza (FIG. 34). Estas acciones pueden y deben ser ejecutadas con el objetivo de reducir el impacto generado por las actividades antropogénicas, cuando las conocidas 3 Rs no son suficientes.

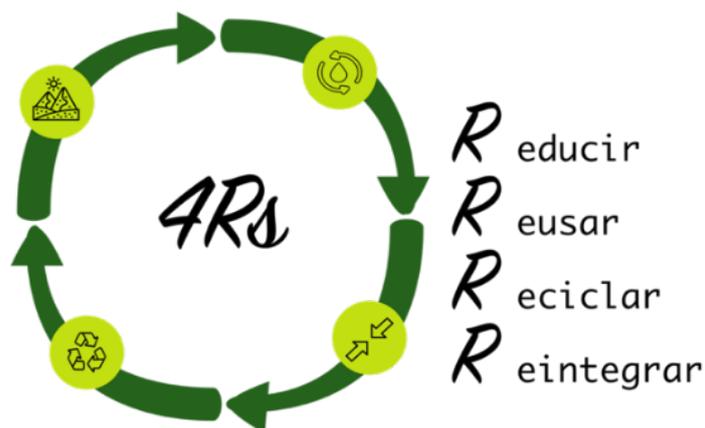


FIG. 34 LAS 4 RS COMO ACCIÓN PARA EL MANEJO DE RESIDUOS PARA ALCANZAR EL EQUILIBRIO CON LOS MEDIOS NATURALES.

En el caso de la minería, la cuarta R es una medida que debe ser incorporada cuando se genera algún residuo y antes de su almacenamiento final; siendo parte de una transición hacia una minería responsable y sostenible. Su empleo, puede evolucionar el manejo de sus grandes volúmenes de residuos.

Esta última R cierra el sistema de aprovechamiento de nuestros residuos y reduce el impacto, ya que en cada una de las conocidas 3 Rs existe inevitablemente la generación de un residuo secundario. Como anteriormente se ha mencionado, en la **reducción**, es evidente que únicamente se busca disminuir la cantidad de residuo (Lébre et al., 2016) o reducir la peligrosidad del material (Amar et al., 2020); en el **reprocesamiento**, es posible extraer solo una fracción que sea de interés (Lébre et

al., 2016) y en el **reúso**, es posible que no todo el material sea utilizado (Lébre et al., 2016). Entonces, la 4ta R significa que los residuos secundarios sean sometidos a procesos físicos y químicos necesarios para regresarlos o integrarlos a los ecosistemas (Lottermoser, 2011), pero más allá que sea considerado como una parte de la jerarquía anteriormente propuesta, que sea una medida integrada a nuestro manejo de residuos. Estas acciones pueden y deben ser ejecutadas con el objetivo de reducir el impacto que como humanos generamos. Para lograrlo, es esencial tomar en cuenta especificidades dependientes de cada lugar, tales como: los valores de fondo, flora, fauna, condiciones climáticas, contexto hídrico, asentamientos humanos, uso de suelo previo a las operaciones mineras y el paisaje de cada sitio.

En general, esta propuesta pone a las 4 Rs en el mismo nivel que las medidas de manejo del residuo, en las que es imperativo fomentar la búsqueda, desarrollo e integración de herramientas que permitan un desempeño más responsable y circular en nuestras actividades mineras, cerrando ciclos de perturbación a los medios naturales. Para aplicarlas, se requieren esfuerzos y un cambio de percepción de los residuos, de un producto no deseado y descartable, a recursos potencialmente valiosos (Lottermoser, 2010).

---

### 5.1.2 EL MODELO DE ECONOMÍA CIRCULAR PARA LA MINERÍA

---

Al observar los ciclos naturales perfectos que mantienen en equilibrio a los ecosistemas, es inevitable pensar en direccionar esfuerzos para integrar a las actividades antropogénicas a la naturaleza para semejarlos a los procesos naturales. La respiración, la fotosíntesis, los ciclos de diferentes elementos y el aprovechamiento e importancia de todos los componentes que integran el suelo, son esquemas que permiten comprender el balance existente en nuestro planeta. En ellos, lo que podría pensarse un residuo, es en realidad, útil o necesario para otros procesos u organismos. Contrastantemente, el hombre rebasa aquella capacidad amortiguadora natural de los sistemas, llevándonos a romper la armonía y, por lo tanto, poniendo en riesgo a los seres vivos que interactúan en diversos entornos.

Los residuos minero-metalúrgicos, debido a su potencial peligrosidad y su contribución a una historia prolongada de daños a los ecosistemas y la salud humana, han ganado una atención especial. Esta situación se ve exacerbada por la presión social derivada de las prácticas empleadas para la disposición de los residuos mineros. En este contexto, se promueve la implementación de modelos que incorporen las 4Rs, destacando un desempeño responsable y una utilización exhaustiva de los recursos. El objetivo no es solo remediar, sino reintegrar a los ecosistemas y al paisaje.

Para la creación de este modelo, esta investigación está inspirada en el modelo del ciclo de las rocas creado por los autores (Singh y Bushee, 1977), el cual presenta de forma circular un ciclo en el que se forman los diferentes tipos de rocas con los cambios físicos y químicos en diferentes medios, sin embargo, todos los procesos vuelven a alguna parte del ciclo en algún momento.

Por lo tanto, con el uso del concepto de Economía Circular anteriormente mencionado y el ciclo de las rocas, se propone un modelo (FIG. 35) que toma en cuenta las 4Rs, los principales procesos de la minería metálica, la remediación ambiental y establece una serie de acciones conceptuales y técnicas con el objetivo de integrar la valorización de residuos como el núcleo para un mejor manejo de residuos sólidos.



## **Equilibrio natural**

El modelo comienza con un equilibrio natural de los ecosistemas, que es alterado por las actividades extractivas (la exploración no es tomada en cuenta, ya que la cantidad y el flujo de residuos no es constante y representativo). Sin embargo, este balance es interrumpido por la explotación y el beneficio (procesamiento y beneficio). El **Reducir** puede ser empleado en este punto, habiendo una reducción de la explotación, sin embargo, la explotación va en aumento por la baja en las leyes (Esposito et al., 2015) y la alta demanda de minerales (International Energy Agency, 2021), por lo tanto, otras formas de reducir serán analizadas.

## **Residuo**

Todo residuo generado por estas dos etapas puede tener las características que lo hacen potencialmente peligroso. Por lo que se sugiere que cualquier residuo que se genere tiene que ser sometido por una evaluación de peligrosidad en algún momento de la toma de decisiones (si no es en un inicio). El residuo puede ser **reducido** de 2 formas: en primer lugar, por medio de agregar procesos en el beneficio o en el desarrollo de circuitos para disminuir las pérdidas minerales y, en segundo lugar, reduciendo su potencial tóxico, como lo es la desulfuración, que permite hacer una preselección de sulfuros (especialmente la pirita) para evitar la generación de drenaje ácido de mina y consecuentemente la liberación de EPTs (Amar et al., 2020); sin embargo, al remover la pirita se tiene un producto nuevo, el cual, tiene que ser utilizado para recuperar hierro (valorización) o por el lado contrario, pasar por una estabilización o confinamiento hacia una reintegración al medio.

### *Primera toma de decisiones*

En la primera toma de decisiones se busca definir el enfoque de nuestro manejo de residuos. En primer lugar, la evaluación de peligrosidad directa dirige el manejo a una estabilización y reintegración al medio; sin embargo, la caracterización del residuo se enfoca en las características que puedan hacerlo peligroso. Por otro lado, se tiene un enfoque económico hacia una evaluación de potencial de valorización, lo que nos indica que se busca un posible aprovechamiento del residuo. Es importante señalar que, por este camino, un residuo puede ser valorizado a pesar de ser peligroso; no

obstante, el residuo secundario generado posterior a su aprovechamiento tendrá que tomar un camino hacia la evaluación de su peligrosidad.

### **Evaluación de Peligrosidad**

En esta etapa, buscamos conocer la naturaleza de nuestro residuo, la cual podría representar un peligro. Por ello, podemos emplear la caracterización de residuos mineros de la Norma Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009 (SEMARNAT, 2011). En este sentido, es necesario determinar las concentraciones totales de los elementos potencialmente tóxicos (EPT) y compararlas con los límites máximos permisibles de la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. En caso de que dichas concentraciones superen los límites establecidos, se procede a determinar la movilidad de los metales y metaloides contenidos en el residuo a través de sus concentraciones solubles. Si estas concentraciones solubles exceden los valores de referencia, se considera que el residuo es peligroso. La evaluación del potencial de generación de drenaje ácido se lleva a cabo mediante el balance de ácido base. Si se determina que el residuo es generador de drenaje ácido, entonces se considera como peligroso. Por último, los residuos con un pH menor o igual a 4 y mayor que 10 también se consideran peligrosos. De acuerdo con estos resultados puede conocerse el potencial que tiene el residuo para generar un impacto negativo al medio o de representar un riesgo. Estas consideraciones tienen que tomarse en cuenta en caso de que haya algún residuo secundario generado durante las siguientes acciones.

Finalmente, ya reconocidos los posibles peligros de un residuo (valorizado o no) se pasa a una estabilización para disponer a los residuos de una manera segura y estable en condiciones atmosféricas.

### **Muestreo Económico (estrella)**

Dado a que el siguiente paso a realizarse es la evaluación de potencial, es importante reconocer la necesidad de llevar a cabo un muestreo con un enfoque económico, para poder identificar el potencial de valorización de nuestro residuo. El muestreo, debe ser adaptado y realizado superficialmente y a profundidad, para que la caracterización pueda ser representativa en este nuevo enfoque económico. Los residuos mineros

son dispuestos sin seguir un orden o una lógica; posiblemente su distribución y composición pueda ser influenciado por la zona del yacimiento que se explota en ese momento; aun así, la interacción con los procesos atmosféricos posterior a la disposición puede dar lugar a procesos químicos que modifiquen la mineralogía original y movilicen algunos elementos.

Las consideraciones son las siguientes:

1. Si hay procesos activos, el muestreo se lleva a cabo como un monitoreo de los residuos generados por los procesos involucrados. Este muestreo está alineado con dos objetivos principales: reducir las pérdidas de metales mediante la mejora de los métodos de beneficio, o identificar el potencial de valorización de los residuos.
2. Si existe un pasivo ambiental, el muestreo se realiza considerando la totalidad del residuo en estudio, con el objetivo de aprovechar el material descartado, en lugar de considerarlo como un flujo de residuos.

### **Potencial de Valorización**

Para evaluar el potencial de valorización de un residuo, es crucial considerar aspectos conocidos como el tipo de yacimiento y los métodos de separación de metales o minerales empleados. En este sentido, se destaca la importancia de ampliar el conocimiento sobre los subproductos de los metales primarios, como lo señalan Nassar et al. (2015) en la rueda de compañía de los metales. Al comprender la mineralogía de un yacimiento y su contexto geológico, se abre la posibilidad de desarrollar proyectos mineros que consideren desde el principio los metales o compuestos que podrían ser obtenidos como subproductos en alguno de los procesos involucrados. Esta perspectiva marca un cambio significativo en la industria minera, donde un metal puede representar ingresos importantes, pero también hay otros que pueden ser recuperados durante los procesos o incluso antes de la remediación de pasivos ambientales.

Sin embargo, el tipo de yacimiento no garantiza ni descarta la presencia de metales específicos, ya que estos pueden estar presentes en diversos marcos tectónicos o mostrar variaciones regionales, como se observa en el caso mencionado

anteriormente de los pórfidos de cobre que contienen Re, Se y Te (John y Taylor, 2016). Por lo tanto, aunque el contexto geológico y, por consiguiente, la mineralogía puedan servir como guía para identificar el potencial, es necesario realizar una caracterización tanto cualitativa como cuantitativa del o los residuos para determinar su viabilidad.

En esta etapa se lleva a cabo una caracterización física, química y mineralógica, con el objetivo de conocer totalmente nuestro residuo, con enfoques cuantitativos y cualitativos. Por consiguiente, esta etapa es la primera que identifica el posible manejo o fin (reciclaje o reúso) que se le puede dar.

#### Caracterización física o guía

1. Descripción de características físicas visibles e identificación del tipo de material (sólido), tal como: jales, escorias (metálicas o vítreas), terreros, sedimentos de lixiviados, entre otros.
2. Análisis granulométrico (de ser posible).
3. Separación de material por propiedades físicas, como, por ejemplo: densidad y propiedades magnéticas. Dicha separación podrá servir para una mejor caracterización mineralógica.

#### Caracterización química o cuantitativa

1. Análisis de pH y conductividad eléctrica: estos parámetros son importantes ya que puede ser de utilidad para conocer los posibles minerales o especies químicas formadas en dichas condiciones.
2. Determinación de concentraciones totales de todos los elementos presentes (geoquímica total), no solo nos enfocamos en los EPTs, ya que se busca conocer el potencial total del material para ser valorizado. En este punto, los costos de las técnicas son tomados en cuenta, ya que hay técnicas que pueden ser muy costosas; sin embargo, de acuerdo con el conocimiento previo del yacimiento (posibles subproductos), se puede tomar en cuenta la posibilidad de tener la presencia de elementos de interés y optar por análisis más detallados para elementos como, por ejemplo, las tierras raras.

3. Con las concentraciones conocidas, se realiza una comparación con las concentraciones de los elementos en la corteza continental superior y así determinar posibles enriquecimientos o anomalías.
4. Posteriormente, comparar con las concentraciones de los elementos atractivos con las leyes de corte de minas activas. Esto sirve como una guía para hacer una preselección de elementos que presenten concentraciones cercanas a ellos. Es importante recordar, que las leyes de corte son determinadas en cada sitio de acuerdo con los costos involucrados en los diferentes procesos, el precio de los metales en el mercado, y los servicios y recursos disponibles en el sitio, dado a esto, la ley de corte representa únicamente una guía y no algo definitivo.

#### Caracterización mineralógica o cualitativa

Esta caracterización es considerada como la más importante en este modelo. Es aquí cuando se conoce el verdadero potencial de nuestro residuo; más allá de las concentraciones presentes, la especie química o el mineral en el que se encuentren los elementos es de vital importancia para seleccionar métodos que permitan romper las estructuras o enlaces entre los elementos, para hacer así disponible el metal de interés o en otro caso para darle al material otra función. Esto toma mayor relevancia al comprender que la mayoría de los elementos no se encuentran presentes en minerales de mena o primarios, sin embargo, pueden estar dentro de las estructuras como impurezas. Los métodos de caracterización mineralógica o de especies químicas tienen que ser seleccionados de acuerdo con las características físicas previamente determinadas.

En el caso de los sitios con residuos con mayor tiempo de exposición, se puede pensar que la interacción entre el residuo y los fluidos hayan dado pie a reacciones químicas que hayan propiciado la solubilización de metales y formación de nuevas fases por medio de la sorción y la precipitación jugando un papel crítico en la captura de elementos de interés en minerales secundarios (Jamieson et al., 2015). Por otro lado, residuos modernos tendrán una influencia principalmente del yacimiento, junto con los procesos involucrados en el beneficio y métodos de extracción, los cuales no son 100% eficientes, abriendo la posibilidad a que puedan contener concentraciones

económicas de algunos elementos en los minerales o compuestos. En ambos casos se pone en manifiesto la necesidad de realizar una buena caracterización de nuestro residuo tomando en cuenta sus especificidades.

Dada la importancia de la caracterización cuantitativa, se propone el siguiente diagrama para la selección de métodos para realizar una caracterización, cuando se tienen jales, escorias y terreros:

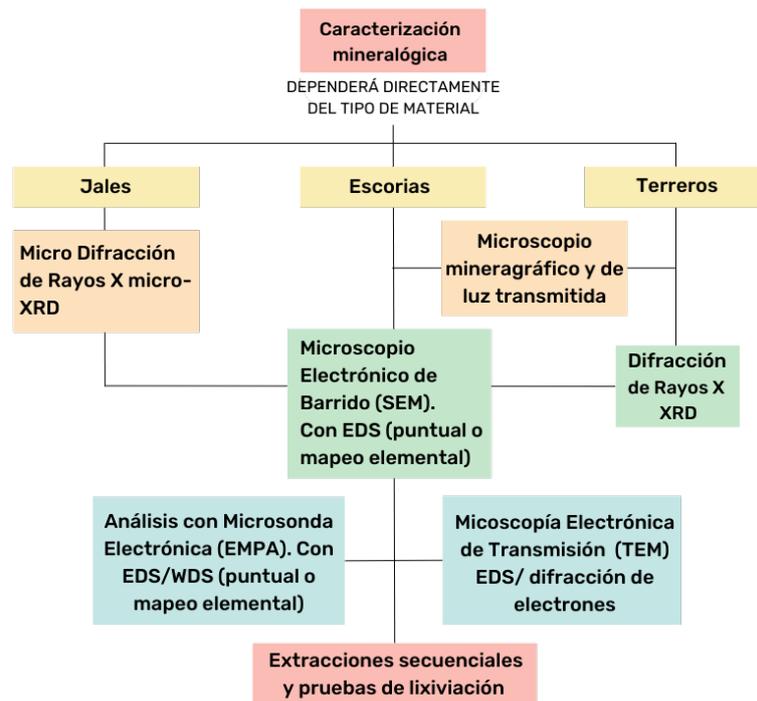


FIG. 36 PROPUESTA DE DIAGRAMA DE FLUJO JERÁRQUICO DE MÉTODOS PARA LA CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE JALES, ESCORIAS Y TERREROS.

La selección de los métodos fue de la técnica más utilizada a la más compleja y, por lo tanto, la más costosa, sin embargo, como última opción para todos los materiales, se proponen las extracciones secuenciales, debido a que su determinación es indirecta. Para las demás técnicas, si es posible, realizar una separación de fases de acuerdo con las propiedades físicas facilitaría la caracterización.

Por último, es necesario tomar en cuenta que las concentraciones económicas de algunos metales de interés pueden ser muy bajas y las técnicas para determinar su presencia en los minerales pueden ser muy costosas y detalladas. Por ello, es necesaria la participación de la academia en el entendimiento más profundo de las

asociaciones de estos metales, ya que entender su asociación puede determinar la factibilidad de recuperación, como se analizó en los casos del litio y el oro.

### **Prefactibilidad**

1. En esta etapa, se tiene un entendimiento del posible potencial que poseen nuestros residuos, por ello, de acuerdo con la caracterización se realiza la propuesta y se ejecutan las primeras pruebas metalúrgicas o experimentos (dependiendo de cada material) a nivel laboratorio. Es importante reconocer que una buena caracterización cualitativa permitirá una selección más adecuada de los métodos, con ello, se reducen costos en la realización de pruebas y se tiene una visión más clara si el residuo es candidato para ser valorizado.
2. Estimación de volumen total del material de interés, tanto para un reciclaje como para ser utilizado como materia prima, con ello se debe realizar una estimación del material a recuperar (tonelaje/grado).
3. De no ser exitosos los estudios, se procede a una evaluación de los peligros asociados y, posteriormente, a realizar una estabilización que lleve a una reintegración al medio natural o como última opción, a una disposición controlada del residuo.

### **Factibilidad**

1. Pruebas piloto del método de extracción o separación del material de interés económico.
2. Evaluación económica, en la que se tomen en cuenta los siguientes puntos:  
En reciclaje: precio del metal o material en el mercado, costos de los procesos de recuperación (incluyendo reactivos), construcción de infraestructura (incluyendo planta, energía eléctrica y acceso al agua) o transporte del material a plantas existentes.  
En reúso: Cantidad total de material que puede ser utilizado, costos de separación o selección, construcción de infraestructura (planta, incluyendo energía eléctrica y acceso al agua) o transporte del material a plantas existentes y costos en procesos de elaboración o preparación.

3. En esta etapa, es necesario analizar el mercado en el que se va a insertar el producto obtenido. Es necesario explorar las cadenas de valor del material, así como los posibles compradores en industrias estratégicas.
4. La fase final es crucial antes de tomar la decisión de valorización, ya que se toman en cuenta los nuevos residuos generados. Por lo tanto, es fundamental comprender a fondo este residuo para garantizar un manejo adecuado. Por lo tanto, si no es factible llevar a cabo una valorización, de nuevo se toma el camino hacia una estabilización para integrar al medio ambiente o disponer de la forma más segura.

### Segunda toma de decisiones

#### **Valorización**

En esta etapa se decide si el residuo se recicla o se reúsa. En el caso de un reciclaje, es posible que después del beneficio pueda volver al ciclo y pueda existir un reúso, de acuerdo con las etapas de evaluación anteriormente mencionadas.

#### **Residuo Secundario**

Es fundamental tener en cuenta que cuando se produce un residuo secundario y no tiene potencial de valorización o no es factible, es necesario caracterizarlo para determinar si representa algún peligro y, especialmente, para gestionarlo adecuadamente y reintegrarlo al medio ambiente.

#### **Estabilización**

En esta etapa se busca el utilizar procesos físicos y químicos para que nuestro residuo se mantenga estable en un sitio de disposición, para que al encontrarse expuestos a condiciones del medio no represente un peligro para el medio ambiente o a la salud humana. Debido a esto, el control de los EPTs y de sus características tanto físicas como químicas que puedan hacer peligrosos, controlando riesgos de movilización de contaminantes en condiciones ambientales del sitio en el que se encuentran.

Los métodos para llevar a cabo una estabilización/solidificación, pueden ir desde aquellos con principios del cemento (Djellali et al., 2019); agregando agentes estabilizantes (Álvarez-Ayuso y Murciego, 2021); biocementación utilizando bacterias (Mwandira et al., 2022); con fitoestabilización, buscando de manera progresiva

estabilizar los EPTs con una capa de vegetación tolerante a ellos (Barbosa y Fernando, 2018); entre otros.

### **Reintegración al equilibrio natural**

Posterior a la estabilización se busca una reintegración, con el objetivo de que el residuo pueda formar parte del medio natural. En las actividades mineras, como se ha mencionado con anterioridad, el movimiento de grandes volúmenes de roca es uno de los aspectos más discutidos y complicados a la hora de reducir el impacto al ambiente y al paisaje. Por ello, el material puede ser estabilizado de forma que pueda irse adaptando y reinsertando a los procesos y ciclos naturales, para así regresar a la mayor medida posible el equilibrio de los sitios alterados. Para lograrlo, es necesario tomar en cuenta tres aspectos: la flora, fauna y condiciones climáticas; el uso que se le dará al material o simplemente será estabilizado y reintegrado y, por último, el uso de suelo del sitio tratado.

En el caso de minas activas, esta reintegración puede llevarse a cabo durante el avance de las operaciones y los residuos son generados. Entre las diferentes opciones, pueden ser: la alternativa profundamente estudiada, de relleno de minas subterráneas para dar estabilidad; el reciclaje del residuo como relleno como pasta cementada tanto en minas subterráneas como en minas a cielo abierto para mejorar la estabilidad de taludes (Lu et al., 2018) o en relleno de tajo en minas a cielo abierto, en donde se tienen varios tajos, en los que puede haber un relleno en los tajos inactivos mientras se trabaja paralelamente en otros activos (Cacciuttolo y Atencio, 2023). Estas opciones llevan al manejo de residuos a un cierre de minas gradual, que permite repartir los costos de este y así evitar que se vuelva una labor únicamente realizada al fin de las operaciones.

Por otro lado, en los pasivos ambientales o residuos históricos, el mayor objetivo es un aprovechamiento hacia una remediación ambiental, por ello, se busca aprovechar al máximo el residuo en una sola ocasión, para así poder lograr el propósito de remediar y reintegrar al medio natural y al paisaje.

## 5.2 PROPUESTA DE ELEMENTOS/MATERIALES ESTRATÉGICOS PARA MÉXICO

---

Después de analizar las listas existentes de minerales críticos de varios países, así como los factores considerados para su elaboración y la posición de los países en desarrollo en las estrategias de suministro de recursos minerales, se decidió clasificar los factores internos y externos importantes para comprender el potencial de producción de estos materiales en nuestro país.

1. Factores internos: desde esta perspectiva, se optó por evaluar nuestro potencial en la producción de minerales y la posible demanda nacional de materias primas minerales para impulsar las actividades económicas principales de nuestro país, centrándonos en el consumo y suministro locales de estos recursos.
2. Factores externos: Se busca entender la importancia de los tratados comerciales que se tienen entre México y otros países, en el que se identificaron los socios comerciales más importantes y sus listados de materiales críticos para determinar las oportunidades de nuestro país de acuerdo con nuestro potencial de producción y la estrategia de los diferentes países.

Es importante analizar que no se tomó en cuenta el concepto de seguridad nacional con suministro de materiales para fines bélicos, esto, debido a la nula participación de nuestro país en conflictos, sin embargo, se toma en cuenta la idea de estabilidad política del país desde una perspectiva internacional, por la razón de que este factor puede frenar o impulsar la inversión en proyectos mineros y desarrollo del sector. Otro aspecto que no se tomó en cuenta que otros países tomaron para la elaboración de sus listados es la centralización de producción que desencadena un posible riesgo en el suministro, esto es debido a relación comercial con los mayores productores y a las relaciones pacíficas internacionales.

México, se encuentra en un punto en el que es vital resaltar la importancia minera y crear un piso estable para el desarrollo de nuevos proyectos mineros. Claramente escuchar acerca de los minerales críticos y los listados producidos por otros países

crean cierta impaciencia de buscar desarrollar listas propias, sin embargo, las listas son un reflejo de una estrategia nacional mayor, en la que los distintos países han desarrollado una serie de medidas en las que reconocen a los materiales minerales como un puente para lograr sus objetivos y no poner en riesgo su estabilidad económica o política.

Gracias a estas ideas se concluyó en la creación de dos calificaciones: una de materiales de estrategia interna y otra de minerales de estrategia externa, los que reflejen los factores analizados y permitan establecer una planeación para nuestra situación económica. Es necesario resaltar que la creación de un listado únicamente refleja las condiciones analizadas y no es fijo. Se trata de una propuesta dinámica, capaz de adaptarse a posibles modificaciones futuras en respuesta a cambios en las estrategias nacionales

Para elaborar una lista, es crucial reconocer la participación de diversos actores en la industria minera del país, incluyendo a la Secretaría de Economía, el Servicio Geológico Mexicano, la Cámara Minera de México, representantes de diferentes sectores industriales y la academia. La contribución de estas partes interesadas puede enriquecer y fortalecer el marco regulatorio relacionado con los recursos minerales y las diversas cadenas de valor. Además, su conocimiento sobre los yacimientos minerales y la interacción de los elementos en ellos puede sentar una base sólida para el desarrollo minero nacional, promoviendo la colaboración y el intercambio de ideas.

Una estrategia nacional exitosa requiere la conjunción de conocimientos, intereses y una visión compartida para el progreso del país

---

### 5.2.1 FACTORES INTERNOS: POTENCIAL Y NECESIDADES

---

#### **Economía en México y Actividades Económicas**

El porcentaje de participación en el Producto Interno Bruto (PIB) de las diferentes actividades son: actividades primarias, con la menor participación con poco más del 3%, seguido de las actividades secundarias con un casi 30% y el mayor aporte es de las actividades terciarias (Banco de México, 2023) con información de INEGI.

Sin embargo, por actividades (Tabla 7), la industria manufacturera es la que más aporte tuvo al PIB Nacional; en segundo lugar, los servicios inmobiliarios y de alquiler de bienes muebles e intangibles; en tercer lugar, el comercio al por menor; en cuarto lugar, el comercio al por mayor; en quinto lugar, transporte, correos y almacenamiento; en sexto lugar, construcción; en séptimo lugar, servicios financieros y de seguros y en octavo lugar la minería (Banco de México, 2023) con información de INEGI. Los datos presentados de participación en el PIB nacional son del año 2022, sin embargo, son calculados tomando el año base 2013 como punto de referencia para comparar cambios en las estadísticas económicas por el Sistema de Cuentas Nacionales de México (SCNM) (INEGI, 2018).

Es evidente que la minería es una de las actividades más importantes en nuestro país, sin embargo, hay una serie de actividades que también participan en la economía nacional, como, por ejemplo, las actividades manufactureras que involucran diferentes industrias que requieren de materias primas minerales o que indirectamente dependen de cadenas de valor que las requieren. Del mismo modo la industria de construcción y la de agricultura que dependen del suministro de productos minerales.

Dada la relevancia de las industrias manufactureras se presenta una clasificación del aporte de las diferentes actividades e industrias que son las más importantes de esta categoría (Tabla 8). Las 10 que más participan en el PIB proporcionado por este grupo de actividades, en orden desde la que más aporta a la que menos son las siguientes: Industria alimentaria; fabricación de equipo de transporte; equipo de computación y electrónicos; industria química; industria de las bebidas y el tabaco; industrias metálicas básicas; fabricación de maquinaria y equipo; equipos de generación eléctrica, aparatos y accesorios; productos metálicos y la industria del plástico y del hule. En una gran cantidad de estas actividades mencionadas se emplean materias primas minerales. Sin embargo, para comprender mejor directamente qué productos pueden ser atractivos para una estrategia nacional, se decidió analizar las importaciones y exportaciones más importantes del país para una visión clara del potencial que posee y las necesidades de las industrias internas.

TABLA 7 PARTICIPACIÓN EN EL PIB NACIONAL Y LA PRODUCCIÓN EN MILLONES DE PESOS DEL AÑO 2022 A PRECIOS DE 2013 TRIMESTRAL. A LA DERECHA SE MUESTRA EL LUGAR EN LA PARTICIPACIÓN DE CADA ACTIVIDAD EN EL PIB. DE COLOR VERDE, LAS ACTIVIDADES TERCIARIAS; DE COLOR AZUL, LAS ACTIVIDADES SECUNDARIAS Y DE AMARILLO, LAS ACTIVIDADES PRIMARIAS.

Actividades	Millones de pesos \$ a precios de 2013 trimestral					
	Ene-Mar 2022	Abr-Jun 2022	Jul-Sep 2022	Oct-Dic 2022	Total	
Servicios de esparcimiento, culturales y deportivos, y otros servicios recreativos	65,582.36	100,352.66	86,567.43	89,056.91	341,559.36	20
Dirección de corporativos y empresas	126,205.65	135,034.68	151,335.18	152,691.02	565,266.53	19
Servicios de apoyo a los negocios y manejo de desechos y servicios de remediación	197,197.19	204,321.67	196,253.29	179,196.38	776,968.53	18
Electricidad, agua y suministro de gas por ductos al consumidor final	210,871.18	234,961.29	247,230.00	225,890.71	918,953.18	17
Otros servicios excepto actividades del gobierno	331,410.03	307,173.63	350,132.59	338,411.06	1,327,127.31	16
Servicios profesionales, científicos y técnicos	382,321.33	398,048.71	354,823.59	385,043.43	1,520,237.06	15
Servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas	366,477.13	421,017.4	391,207.62	399,960.98	1,578,663.13	14
Servicios de salud y de asistencia social	408,939.44	436,945.33	429,374.94	409,494.69	1,684,754.4	13
Agricultura, ganadería, aprovechamiento forestal; pesca, caza y captura; relacionados	566,229.48	627,435.8	522,052.69	771,211.13	2,486,929.1	12
Información en medios masivos	646,047.89	721,108.3	670,981.11	670,161.45	2,708,298.75	11
Servicios educativos	700,513.26	686,956.73	658,453.27	711,454.94	2,757,378.2	10
Actividades del gobierno	692,578.73	707,750.71	691,295.07	722,090.19	2,813,714.7	9
<b>Minería</b>	<b>892,857.01</b>	<b>852,998.25</b>	<b>842,856.45</b>	<b>843,575.03</b>	<b>3,432,286.74</b>	<b>8</b>

Servicios financieros y de seguros	860,363.65	857,927.63	870,634.68	886,665.98	3,475,591.94	7
Construcción	1,102,137.57	1,088,557.25	1,076,657.88	1,126,221.2	4,393,573.9	6
Transportes, correos y almacenamiento	1,152,374.52	1,251,440.24	1,246,592.53	1,270,191.41	4,920,598.7	5
Comercio al por mayor	1,577,181.36	1,629,780.16	1,710,922.02	1,718,353.35	6,636,236.89	4
Comercio al por menor	1,595,419.19	1,730,139.73	1,732,138.56	1,936,859.68	6,994,557.16	3
Servicios inmobiliarios y de alquiler de bienes muebles e intangibles	2,118,513.58	2,154,484.97	2,148,332.52	2,163,062.14	8,584,393.21	2
Industrias manufactureras	2,998,803.11	3,045,639.23	3,105,714.48	3,054,210.37	12,204,367.2	1

TABLA 8 APOORTE AL PRODUCTO INTERNO BRUTO DE LA INDUSTRIA MANUFACTURERA POR ACTIVIDAD, PRODUCCIÓN EN MILLONES DE PESOS A PRECIOS DE 2013 TRIMESTRAL. DEL LADO DERECHO SE MUESTRA EL LUGAR QUE OCUPA LA ACTIVIDAD EN LA PARTICIPACIÓN DEL TOTAL DE LA PRODUCCIÓN DE LAS INDUSTRIAS MANUFACTURERAS.

Actividades	Millones de pesos a precios de 2013 trimestral					
	Ene-Mar 2022	Abr-Jun 2022	Jul-Sep 2022	Oct-Dic 2022	Total	
Confección de productos textiles	13,137.54	11,681.38	12,455.69	12,569.34	49,843.95	21
Productos de cuero, piel y materiales sucedáneos	17,910.33	17,875.1	18,847.85	17,788.69	72,421.97	20
Impresión e industrias conexas	19,983.92	20,890.34	21,812.8	22,812.43	85,499.49	19
Insumos textiles	24,509.31	23,963.64	25,023.14	21,071.00	94,567.09	18
Industria de la madera	25,125.56	24,463.02	23,267.79	24,050.9	96,907.27	17
Muebles y productos relacionados	31,126.09	29,135.43	30,733.16	35,671.38	126,666.06	16
Derivados del petróleo y del carbón	49,948.55	49,229.67	48,463.76	51,806.91	199,448.89	15
Prendas de vestir	49,919.16	51,709.4	53,519.1	51,626.07	206,773.73	14
Industria del papel	55,782.61	59,494.81	57,073.1	54,945.28	227,295.8	13

Otras industrias	66,063.97	68,132.29	73,463.54	72,540.11	280,199.91	12
Productos a base de minerales no metálicos	81,210.26	79,525.32	81,304.74	81,864.7	323,905.02	11
Industria del plástico y del hule	95,272.23	97,791.00	97,088.91	94,220.27	384,372.41	10
Productos metálicos	102,222.48	102,555.6	102,897.16	101,247.82	408,923.06	9
Equipo de generación eléctrica y aparatos y accesorios	102,390.23	105,194.77	108,370.82	103,129.76	419,085.58	8
Fabricación de maquinaria y equipo	107,375.68	119,472.91	121,722.05	118,457.72	467,028.36	7
Industrias metálicas básicas	186,011.87	187,665.78	182,560.24	188,426.16	744,664.05	6
Industria de las bebidas y del tabaco	168,680.11	191,373.41	206,331.59	193,246.26	759,631.37	5
Industria química	235,646.99	228,435.12	230,922.81	216,777.47	911,782.39	4
Equipo de computación y electrónicos	269,521.44	279,740.74	294,395.45	286,008.24	1,129,665.87	3
Fabricación de equipo de transporte	567,754.2	571,908.27	611,145.49	583,536.34	2,334,344.3	2
Industria alimentaria	729,210.6	725,401.24	704,315.3	722,413.53	2,881,340.67	1

### **Balanza comercial: Importaciones de productos en México**

Al 2022 la balanza comercial del país presentó cifras negativas, las cuales se debieron a las actividades petroleras que mostraron valores negativos, por una disminución en las actividades; sin embargo, la balanza comercial no petrolera resultó con superávit. A pesar de ello, es necesario el analizar las exportaciones que realiza el país, lo que lo posiciona estratégicamente en los tratados comerciales y, por otro lado, en las importaciones. Las importaciones pueden proporcionar una visión de las actividades económicas que se realizan en el país, lo cual puede llevarnos a considerar una estrategia de abastecimiento local, lo que permitiría cubrir cadenas de valor que juegan un papel importante en el desarrollo económico del país. Por el otro lado, las exportaciones pueden ligarse a las necesidades externas de los socios comerciales más importantes, situando al país en una postura estrategia para tratado comerciales más equitativos y justos.

### Importaciones totales al 2022

En la tabla (Tabla 9) se muestran los 23 productos que ocupan los primeros lugares en las importaciones de México en la cual, es claro notar la gran variedad de productos que se importan a nuestro país. Se aprecian productos para diferentes usos, máquinas, aparatos e inclusive, metales y su manufactura (ANEXO. 1).

TABLA 9 BALANZA COMERCIAL DE PAGO DE IMPORTACIONES POR PRODUCTO. LAS IMPORTACIONES TOTALES SE PRESENTAN EN MILES DE DÓLARES E INDICAN EL LUGAR JERÁQUICO QUE OCUPAN DE ACUERDO CON SU VALOR.

Balanza de pagos (Importaciones)		
Productos	Importaciones Totales 2022 en miles de dólares	Lugar
Abonos	3,513,535	23
Cobre y sus manufacturas	3,750,334	22
Aceites esenciales y resinoides	3,993,947	21
Productos químicos inorgánicos	4,439,873	20
Muebles; medicoquirúrgico; no expresados en otra parte	4,612,094	19
Carne y despojos comestibles	6,007,673	18
Semillas y frutos oleaginosos; frutos diversos	6,244,167	17
Productos farmacéuticos	6,252,410	16
Papel, cartón y sus manufacturas	7,566,614	15
Caucho y sus manufacturas	8,800,587	14
Cereales	8,886,124	13
Productos de las industrias químicas	9,568,200	12
Aluminio y sus manufacturas	11,640,041	11
Manufacturas de fundición de hierro o acero	12,739,435	10
Productos químicos orgánicos	13,295,824	9
Instrumentos y aparatos de óptica y médicos	18,740,400	8
Fundición, hierro y acero	20,822,193	7
Productos no clasificados	24,481,961	6
Plástico y sus manufacturas	32,721,370	5
Vehículos terrestres y sus partes	48,287,143	4
Combustibles minerales y sus productos	62,903,309	3
Aparatos mecánicos, calderas, partes	94,223,147	2
Máquinas y material eléctrico	117,000,000	1

Entre los materiales que se destacan incluyen productos minerales de hierro, cobre, aluminio y sus manufacturas. Además, se observan productos ya elaborados, lo que indica que la importación de estos artículos se debe a la necesidad de utilizarlos en cadenas de valor donde su fabricación en el extranjero resulta más conveniente debido a consideraciones de costos o a la ausencia de capacidad de manufactura local.

### Exportaciones totales al 2022

Por otro lado, los productos principales de exportación (Tabla 10) son los vehículos terrestres y sus partes, lo cual es evidente ya que según los datos de INEGI la industria automotriz es aquella que hace el mayor aporte de divisas al país. Después de estos productos, aparecen una gran cantidad de productos terminados tales como máquinas, muebles y aparatos mecánicos. Adicionalmente aparece el Cu, Al, metales preciosos, minerales metalíferos y escorias (entre los que se mencionan: minerales y concentrados de Mn, Cu, Pb, Zn, Mo, minerales de metales preciosos; cenizas y residuos que contengan metal y escorias).

Finalmente, el listado incluye una amplia gama de productos agrícolas, que van desde plantas, raíces y tubérculos hasta cereales y frutas. Esto subraya la relevancia de los productos mexicanos, ya que el país es el principal productor a nivel mundial de tomate, chiles, pimientos, frutos rojos, cerveza, tequila y otros productos más (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2020). Esta idea nos lleva a considerar que los insumos requeridos para la producción de estos alimentos son de vital importancia para garantizar una producción alimentaria no solo para el consumo local, sino también como una importante fuente de divisas para el país, gracias a las exportaciones que realiza. El abono (en especial abonos minerales químicos nitrogenados y abonos minerales o químicos como fertilizantes tales como: nitrógeno, fosfato y potasio) es uno de los productos que se encuentran en el listado de importaciones. Este es un factor esencial, ya que a pesar de que no todos los países consideran este tipo de minerales o materiales como críticos, países como Canadá que dependen fuertemente de las actividades agrícolas lo consideran.

TABLA 10 BALANZA COMERCIAL DE PAGO DE EXPORTACIONES POR PRODUCTO. LAS EXPORTACIONES TOTALES SE PRESENTAN EN MILES DE DÓLARES E INDICAN EL LUGAR JERÁQUICO QUE OCUPAN DE ACUERDO CON SU VALOR

Balanza de pagos (exportaciones)		
Productos	Exportaciones Totales 2022 en miles de dólares	Lugar
Aceites esenciales y resinoides	2,928,559	23
Cobre y sus manufacturas	3,046,962	22
Manufacturas diversas de metales comunes	3,060,295	21
Aluminio y sus manufacturas	3,149,258	20
Carne y despojos comestibles	3,183,957	19
Preparaciones de cereales o leche	3,355,838	18
Vehículos, material para vías férreas	4,180,460	17
Caucho y sus manufacturas	4,571,925	16
Fundición, hierro y acero	6,973,450	15
Perlas, piedras y metales preciosos	8,337,646	14
Minerales metalíferos, escorias	8,387,460	13
Frutas y frutos comestibles	8,733,020	12
Productos no clasificados	8,942,348	11
Hortalizas, plantas, raíces y tubérculos	9222481	10
Manufacturas de fundición de hierro o acero	10,067,593	9
Bebidas y vinagre	11,646,749	8
Muebles; medicoquirúrgico; no expresados en otra parte	12,783,517	7
Plástico y sus manufacturas	13,145,881	6
Instrumentos y aparatos de óptica y médicos	22,839,433	5
Combustibles minerales y sus productos	37,694,492	4
Máquinas y material eléctrico	97,325,195	3
Aparatos mecánicos, calderas, partes	103,006,268	2
Vehículos terrestres y sus partes	136,075,854	1

### Producción minera de México y su participación a nivel mundial

México es un país con una larga historia de producción minera, lo que ha llevado al desarrollo económico de gran número de comunidades. Este país es un importante productor de diversas materias primas minerales que abastecen a más de 70 sectores productivos (CAMIMEX, 2023).

La participación en el año 2022 del sector minero porcentual en Producto Interno Bruto nacional fue de 4.335% con un valor de 795,270 Millones de pesos (entre

actividades mineras, metalúrgicas y cadena minera). La balanza comercial minero-metalúrgicas al 2022 de productos metálicos (en millones de dólares) fue de 9,505 y de los no metálicos de -1,555, mostrando así, un déficit en minerales no metálicos. Por otro lado, la balanza comercial total de esta industria fue de 7,950, mostrando un superávit, sin embargo, debido a un baja en las exportaciones y a un aumento en las importaciones se redujo el superávit en comparación con los dos años anteriores, información de INEGI presentada por CAMIMEX (2023).

De acuerdo con los datos publicados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). En el periodo del año 2018 al 2022, México produjo 29 productos minero-metalúrgicos de los 31 analizados (cabe mencionar que se mencionan únicamente productos metálicos y no metálicos principales) (INEGI, 2023). Sin embargo, debido a la reducida lista presentada por el INEGI, la información sobre la producción minera mundial fue tomada de los datos proporcionados por World Mining Data (2023) en la que dividen a los productos minerales en 5 categorías analizando 61 productos (Tabla 11).

TABLA 11 CATEGORÍAS DE PRODUCTOS MINERALES Y SUS PRODUCTOS, DE ACUERDO CON WORLD MINING DATA (2023).

<b>Categoría</b>	<b>Productos</b>
<b>Hierro y metales de aleación con hierro</b>	Fe, Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Co, Mn, Mo, Ni, Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , TiO <sub>2</sub> , W y V
<b>Metales no ferrosos</b>	Al, Sb, As, bauxita, Berilio, Bi, Cd, Cu, Ga, Ge, In, Pb, LiO <sub>2</sub> , Hg, REO, Re, Se, Te, Sn y Zn
<b>Metales preciosos</b>	Au, Pd, Pt, Rh y Ag
<b>Minerales industriales</b>	Asbesto, barita, bentonita, minerales de boro, diamantes (gema e industriales), diatomita, feldespato, fluorita, grafito, yeso y anhidrita, caolín, magnesita, perlita, roca fosfatada, potasa, sal, sulfuro, talco, vermiculita y zircón
<b>Minerales energéticos</b>	Carbón térmico, carbón de coque, lignito y uranio

De las categorías presentadas, México produce 27 elementos o compuestos de los 61 analizados (Tabla 12), los cuales en su mayoría son de la categoría de minerales industriales, sin embargo, tiene una participación importante en metales no ferrosos y preciosos. De acuerdo con la información de producción de World Mining Data (2023), el país se posiciona como uno de los diez productores del mundo de quince de estos productos, los cuales son:

1. Primer productor de plata con una participación de 23.59%
2. Segundo productor de fluorita con una participación del 12%
3. Tercer productor de mercurio con una participación del 2.41%
4. Cuarto productor de plomo con una participación de 5.82%
5. Quinto productor de molibdeno con una participación de 6.10%
6. Quinto productor de zinc con una participación del 5.75%
7. Quinto productor de barita con una participación del 3.83%
8. Quinto productor de diatomita con una participación del 6.33%
9. Sexto productor de cadmio con una participación del 4.24%
10. Sexto productor de oro con una participación del 3.86%
11. Séptimo productor de selenio con una participación del 3.46%
12. Octavo productor de yeso y anhidrita con una participación del 3.70%
13. Noveno productor de antimonio con una participación del 0.44%
14. Noveno productor de cobre con una participación del 3.43%
15. Décimo productor de sal con una participación de 2.79%

TABLA 12 PRODUCCIÓN DE ELEMENTOS O MINERALES DE MEXICO Y SU PORCENTAJE EN LA PARTICIPACIÓN MUNDIAL. EL LUGAR A NIVEL MUNDIAL PRESENTA UNA FLECHA QUE INDICA SI BAJO EN

EL LUGAR DE PARTICIPACIÓN (HACIA ABAJO) O SUBIÓ SU NIVEL DE PARTICIPACIÓN (HACIA ARRIBA). EL COLOR INDICA LOS DIFERENTES GRUPO EN LA CLASIFICACIÓN DE WORLD MINING DATA.

Elemento o Compuesto	Unidad	Producción México 2021	Porcentaje producción a nivel mundial	Lugar a Nivel mundial 2021	Mayor Productor	Porcentaje de producción del mayor productor
Fe	t.métr.	10800000	0.66%	15 ↓	Australia	34.93%
Mn	t.métr.	220560	1.04%	12 ↓	Sudáfrica	33.45%
Mo	t.métr.	16319	6.10%	5	China	38.32%
Sb	t.métr.	413	0.44%	9 ↑	China	44.13%
Cd	t.métr.	1051	4.24%	6 ↑	China	40.37%
Cu	t.métr.	734137	3.43%	9	Chile	26.27%
Pb	t.métr.	272231	5.82%	4 ↓	China	42.73%
Hg	t.métr.	40	2.41%	3	China	84.49%
Se	t.métr.	135	3.46 %	7 ↓	China	37.74%
Zn	t.métr.	742926	5.75%	5 ↓	China	31.99%
Au	kg	124776	3.86%	6	China	10.17%
Ag	kg	6118000	23.59%	1	México	23.59%
Barita	t.métr.	320642	3.83%	5 ↓	India	29.87%
Bentonita	t.métr.	80000	43.00%	21 ↑	Estados Unidos	24.43%
Diatomita	t.métr.	160956	6.33%	5 ↓	Estados Unidos	39.23%
Feldespatos	t.métr.	372102	1.04%	15 ↓	Turquía	36.10%
Fluorita	t.métr.	1007118	12%	2	China	64.35%
Grafito	t.métr.	1778	0.15%	14 ↓	China	62.96%
Yeso y anhidrita	t.métr.	6386777	3.70%	8	China	14.47%
Caolín (arcilla china)	t.métr.	223332	0.52%	24 ↓	India	16.46%
Roca fosfatada	t.métr.	136900	18.00%	24 ↓	China	40.96%
Sal (roca, salmueras y marina)	t.métr.	7644755	2.79%	10 ↓	China	20.84%
Sulfuro (elemental/ industrial)	t.métr.	219439	29.00%	35 ↓	China	20.48%
Talco, steatita y pirofilita	t.métr.	29000	38.00%	25 ↓	India	20.47%
Vermiculita	t.métr.	100	0.02%	11 ↓	Sudáfrica	42.08%
Carbón térmico	t.métr.	2831000	0.05%	21 ↓	China	52.84%
Carbón de coque	t.métr.	4165000	0.39%	14	China	54.16%

El listado completo de los mayores productores de los 61 materiales analizados se encuentra en (ANEXO. 3).

Un factor que merece atención, a pesar de no figurar en la lista de los materiales producidos por México, es el uranio. Esto se debe al potencial de producción de este elemento en el país. México alberga depósitos de uranio en estados como Chihuahua, Nuevo León, Sonora, Durango, Baja California Sur y Oaxaca, ubicados en rocas ígneas y sedimentarias (Servicio Geológico Mexicano, 2017). El conocimiento del potencial de producción de uranio del país se remonta a la década de 1960 (ININ,2023), por lo que al conocer el tipo de depósitos la transición hacia una explotación podría ser más una reactivación de los objetivos de Uranio Mexicano (URAMEX) que ahora se encuentran a cargo del Servicio Geológico Mexicano

El uranio desempeña un papel crucial en la generación de energía nuclear. Aunque en México solo contamos con la Central Laguna Verde, el suministro local de uranio podría ser una opción estratégica para el país. Además, a nivel internacional, el uranio es considerado un elemento crítico y es esencial para la producción de energía nuclear, la cual se reconoce por ser una fuente de energía limpia y constante.

A medida que la demanda de energía aumenta y se busca reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, la presencia de depósitos de uranio en México podría adquirir una importancia significativa en el panorama energético global

---

## 5.2.2 FACTORES EXTERNOS: OPORTUNIDADES Y ESTRATEGIA

---

### **Tratados comerciales de México**

En México, se tienen un gran número de importantes tratados comerciales tales como (Secretaría de Economía, 2023):

**Norte América:** Tratado entre México, Estados Unidos y Canadá (T-MEC), Asuntos bilaterales con Estados Unidos y Asuntos bilaterales con Canadá.

**América Latina:** Iniciativas bilaterales con Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Costa Rica, Cuba, Chile, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua, Panamá, Paraguay, Perú y Uruguay; Mercosur

(Estados Unidos Mexicanos y la República Argentina, la República Federativa del Brasil, la República del Paraguay y la República Oriental del Uruguay); Regionales como la Alianza del Pacífico (Chile, Colombia, México y Perú), Tratados de Libre Comercio con Centroamérica, etc.

**Asia-Pacífico:** Australia, Corea, China, India, Israel, Japón, Singapur y Tratado de Asociación Transpacífico (Australia, Brunéi Darussalam, Canadá, Chile, Japón, Malasia, México, Nueva Zelanda, Perú, Singapur y Vietnam).

**Unión Europea:** Tratado de Libre Comercio México-AELC (Asociación Europea de Libre Comercio y bilaterales con Ucrania, Turquía, Rumania, República Checa, Belarús, Portugal, Eslovaquia y Suiza.

Sin embargo, es evidente que la relación comercial más importante que tiene nuestro país es con Estados Unidos, ya que las exportaciones de México hacia este socio comercial fueron aproximadamente 81.2% al 2021 (Secretaría de Economía, 2021).

Sin embargo, al 2022, las exportaciones de acuerdo con los países comerciales mostraron de nuevo una predominancia a Estados Unidos con un 78,3%, seguido por Canadá con un 2.7%, China con 1.9%, Alemania con 1.4%, Japón con 0.8%, Brasil con 0.7%, Corea el Sur y Colombia con 0.6% cada uno y Guatemala y Reino Unido con un 0.5%. Por ello, nuestras exportaciones dependen en un 90% de los tratados comerciales con los países de Norte América (Santander, 2023) con información de UN Comtrade Database.

Por otro lado, en cuanto a las importaciones, Estados Unidos vuelve a ser el país con el porcentaje mayor, con un 43.9%, seguido por China con un 19.6%, Corea del Sur con 3.7%, Alemania con 3.1%, Japón con 3%, Malasia con 2.4%, Canadá con 2.2%, entre otros. En consecuencia, también es importante destacar que casi la mitad de las importaciones provienen de Norte América (Santander, 2023) con información de UN Comtrade Database.

Indudablemente en la actualidad, la economía de México está fuertemente ligada a los países de Norte América. El análisis de sus estrategias comerciales, así como del suministro de materiales críticos tiene que ser un aspecto que guíe hacia una postura estratégica en cuanto a la producción de productos minerales. Por ello, los elementos/materiales listados como críticos por nuestros aliados comerciales fueron el principal foco de estudio en esta investigación.

En los mercados de los minerales, se han definido como bloque económicos o asociaciones tipo cártel, en el que nuestro país pertenece a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD, por sus siglas en inglés) y al Acuerdo Estados Unidos-México-Canadá.

Es importante saber que el análisis y planteamiento de estrategias hacia los minerales críticos y estratégicos son dinámicos, por ello, es importante identificar que en un futuro se pueda tener una visión ampliada a otras naciones, lo que permita diversificar los mercados tanto de exportación como de importación. Sin embargo, dado a la dependencia de mercado con América del Norte, esta investigación se dirigió a interés y aprovechamiento local y con consideración a nuestra economía dependiente con nuestros vecinos del norte.

### **Materiales críticos para los países de Norte América**

Los países de Norte América han desarrollado sus listas de minerales críticos. Estados Unidos, tiene en su lista a 50 materiales y Canadá a 48 (Tabla 13) en su gran mayoría coinciden en los materiales, sin embargo, en algunos casos, solo uno de ellos considera como crítico. Por ello, se le dio un valor de 1 a 2 como valor crítico a cada material dependiendo si es crítico para ambos países o únicamente para uno.

TABLA 13 MINERALES CRÍTICOS PARA ESTADOS UNIDOS Y CANADÁ. EN AMARILLO SE MUESTRAN LAS TIERRAS RARAS LIGERAS (LREE), EN VERDE LAS TIERRAS RARAS PESADAS (HREE) Y EN COLOR AZUL LOS ELEMENTOS DEL GRUPO DEL PLATINO. SE PRESENTA UN VALOR CRÍTICO, EL CUAL SE OTORGA DE ACUERDO CON LO SIGUIENTE: 1- CRÍTICO PARA SOLO UN PAÍS Y 2- CRÍTICO PARA AMBOS PAÍSES.

Elemento/Material	Canadá (2021)	Estados Unidos (2022)	Valor Crítico Norte América
Aluminio	x	x	2
Antimonio	x	x	2
Arsénico		x	1
Barita		x	1
Berilio		x	1
Bismuto	x	x	2
Cerio	x	x	2
Cesio	x	x	2
Cromo	x	x	2
Cobalto	x	x	2
Cobre	x		1
Disproσιο	x	x	2
Erbio	x	x	2
Escandio		x	1
Estaño	x	x	2
Europio	x	x	2
Fluorita	x	x	2
Fosfato	x		1
Gadolinio	x	x	2
Galio	x	x	2
Germanio	x	x	2
Grafito	x	x	2
Hafnio		x	1
Helio	x		1
Holmio	x	x	2
Indio	x	x	2
Iridio		x	1
Iterbio	x	x	2
Itrio	x	x	2
Lantano	x	x	2
Litio	x	x	2
Lutecio	x	x	2
Magnesio	x	x	2
Manganeso	x	x	2
Molibdeno	x		1
Neodimio	x	x	2
Níquel	x	x	2
Niobio	x	x	2
Paladio	x	x	2
Platino	x	x	2
Potasa	x		1
Praseodimio	x	x	2
Rodio	x	x	2
Rubidio		x	1
Rutenio	x	x	2

Samario	x	x	2
Tantalio	x	x	2
Telurio	x	x	2
Terbio	x	x	2
Tulio	x	x	2
Titanio	x	x	2
Tungsteno	x	x	2
Uranio	x		1
Vanadio	x	x	2
Zinc	x	x	2
Zirconio		x	1
Total	48	50	

De acuerdo con los materiales determinados como críticos para Estados Unidos y Canadá y la producción de México de estos materiales, los elementos considerados críticos para ambos son: fluorita, zinc y antimonio; únicamente para Estados Unidos la barita y únicamente para Canadá el molibdeno y el cobre. Sin embargo, la producción de otros materiales en nuestro país también se alinea con los intereses.

### **Estabilidad política de los países productores, situación de México en contexto mundial**

Al hablar de la producción de recursos minerales/materiales y más aún, en aquellos denominados críticos, el asegurar su abastecimiento es una necesidad de primera mano. En la mayoría de los productos minerales existe un mayor productor a nivel mundial, lo que en ocasiones monopoliza sus cadenas de valor. Los países buscan obtener los materiales de productores que garanticen el suministro, por ello, surge el concepto de Estabilidad política y ausencia de violencia, el cual se define como: “Medida de la percepción de la probabilidad de que el gobierno sea desestabilizado o derrocado por medios inconstitucionales o violentos, incluida la violencia política y el terrorismo” (World Mining Data, 2023).

Para calcular la estabilidad política y la ausencia de violencia/terrorismo se utilizan los Indicadores mundiales de gobernanza, desarrollados por el Banco Mundial, que se basan en información reunida por diversas organizaciones en las que realizan encuestas a ciudadanos y empresas y a expertos. Para medirlo, se utilizan valores de -2.5 a +2.5; los valores más bajos representan mayor inestabilidad política y van incrementando la estabilidad hasta su máximo de +2.5.

Se tienen 4 clases de estabilidad política las cuales son:  $>+1.25$  estable, entre  $>0$  y  $-1.25$  mediano, entre  $<0$  y  $-1.25$  inestable y  $<-1.25$  extremadamente inestable (The World Bank, 2023).

De acuerdo con los valores que ofrece el Banco Mundial sobre este indicador, México es considerado como un país inestable, con un estimado de gobernanza de  $-0.69$  en los años 2021 y 2022,  $-0.79$  en el año 2020 y  $-0.82$  en el 2019 (The World Bank, 2023). Esto puede afectar la inversión en proyectos mineros dado al incremento de riesgo para los inversionistas. Sin embargo, de acuerdo con la información proporcionada por World Mining Data la gran mayoría de las materias primas minerales son producidas en países inestables, con un total cercano al 87% de las materias primas, y junto con el porcentaje de materiales producidos en países extremadamente inseguros, representan poco más del 90% (World Mining Data, 2023) la tabla de inestabilidad política de los países productores por material se encuentra en (ANEXO. 4).

El atractivo minero, es un valor compuesto entre la percepción de las políticas públicas (regulaciones, impuestos, calidad de la infraestructura, entre otros) y el potencial mineral (regulación ambiental, fiscalidad competitiva, que no haya riesgo político o incertidumbre y un régimen minero estable) (Mejía & Aliakbari, 2023).

México se posicionó en el lugar 37 de 62 de atracción de inversión minera en el año 2022, mostrando un retroceso de 3 lugares al año anterior, esto es primordialmente por la baja puntuación obtenida en política minera en los últimos años. En el caso particular de Latinoamérica se posicionó en el noveno lugar de 13, lo cual indica un mal desempeño en la región. Como parte de las respuestas presentadas en la encuesta anual de las compañías mineras, se incluye una por parte del presidente de una compañía (de manera anónima) que menciona lo siguiente: “La nacionalización del litio genera preocupación acerca del futuro de otros productos y, por otro lado, la prohibición de minas a cielo abierto en México genera gran incertidumbre en el sector” (Mejía & Aliakbari, 2023, p.40). Por lo que es evidente la preocupación e incertidumbre de la administración e interpretación de las regulaciones vigentes.

---

### 5.2.3 MATERIALES ESTRATÉGICOS Y SU CLASIFICACIÓN

---

Se ha identificado que existe una fuerte necesidad en relacionar de manera más cercana los materiales minerales y sus usos, ya que esto permite visualizar de una manera más clara la relación de las materias primas, de las industrias y actividades económicas que dependan de ellos. De tal modo que conociendo las actividades comerciales se puede analizar las cadenas de valor involucradas, y así, impulsar el desarrollo en áreas que se requieran para impedir que algún evento como lo fue la pandemia del COVID-19 o conflictos bélicos como la guerra entre Rusia y Ucrania, pongan en riesgo las diferentes industrias que impulsan la economía nacional o que frene el suministro de productos necesarios para el desarrollo del país.

De acuerdo con los factores internos y externos analizados se creó de una lista de materiales estratégicos. La cual se basa en la idea de generar tres categorías: materiales de estrategia interna (azul), materiales de estrategia externa (amarillo) y materiales que pertenecen a ambas estrategias (verde) (Tabla 14), siendo de importancia en el marco nacional como para los acuerdos comerciales con diferentes países o industrias activas y emergentes.

En aquellos materiales seleccionados para una estrategia interna (fosfato y potasa) fueron seleccionados por la importancia de las actividades agrícolas y ganaderas del país, en el que la producción de alimentos y sus exportaciones representan un importante flujo de capital, por otro lado, la producción de alimentos para el consumo local es un aspecto de gran importancia, que es necesario de asegurar para evitar problemas en caso de interrupción de suministro. Las importaciones de abonos minerales e inorgánicos pueden reducirse en el impulso de su producción local. Lo que puede fomentar el desarrollo económico en otras regiones, favoreciendo la creación de diferentes cadenas de valor que se involucran en la producción de alimentos.

TABLA 14 LISTA DE MINERALES ESTRATÉGICOS PARA MÉXICO. EL COLOR AMARILLO INDICA PARA UNA ESTRATEGIA EXTERIOR, EL VERDE UNA ESTRATEGIA INTERNA Y EXTERIOR Y EN NARANJA UNA ESTRATEGIA INTERIOR.

Elemento/Material	Canadá (2021)	Estados Unidos (2022)
Antimonio	1	1
Arsénico		1
Barita		1
Cadmio		
Cobre	1	
Fluorita	1	1
Fosfato	1	
Grafito	1	1
Litio	1	1
Magnesio	1	1
Manganeso	1	1
Molibdeno	1	
Plata		
Potasa (sales de potasio)	1	
Titanio	1	1
Tungsteno	1	1
Uranio		
Zinc	1	1

En el caso de los de estrategia externa, representan aquellos que son muy importantes en nuestras exportaciones y por otro lado son considerados como críticos para diversos países, especialmente Estados Unidos y Canadá. En el caso de la Ag, no es considerado crítico para estos países, sin embargo, México es un importante productor a nivel mundial, además de que los usos de este metal han ido incrementando, tal es el caso de su uso en la producción de energía eólica y solar, las cuales muestran una tendencia al alza; lo mismo se repite con el Cd, el cual somos importantes productores mundiales, pudiendo posicionarnos en diferentes mercados comerciales. En el caso del Li, es indispensable desarrollar las tecnologías y el estudio del Li en arcillas (el cual se encuentra en nuestro país) ya que si se logra explotar de forma económicamente viable puede representar una gran oportunidad para participar en la producción de baterías. Por el momento no tenemos producción interna de baterías, por ello no es considerado para consumo interno, lo que puede

cambiar con el tiempo. En el caso del grafito, Estados Unidos depende fuertemente de las importaciones de México (Department of Commerce USA , 2023).

Por último, aquellos considerados de estrategia interna y externa son seleccionados debido a que representan importantes cifras tanto en las importaciones, como en las exportaciones de nuestro país. Además, se encuentran en las listas de minerales críticos de los países analizados (que fueron tomadas como punto de partida para el análisis) y finalmente, somos importantes productores a nivel mundial de los materiales propuestos.

En lo que respecta al uranio, a pesar de la ausencia de producción actual en México, se plantea como una estrategia local para el suministro energético en el futuro y como un prospecto para convertirse en un productor importante de este elemento crucial. Para lograr este objetivo, es imperativo establecer las bases mediante la colaboración con el Servicio Geológico y la implementación de una estrategia nacional que haga posible esta iniciativa.

Finalmente, algunas recomendaciones para el futuro son las siguientes:

1. En primer lugar, en cuanto a las tierras raras, es evidente la urgente necesidad de descentralizar su producción a nivel mundial, y el hecho de que México pueda sumarse a los países productores de estos elementos es de gran importancia para las nuevas tecnologías y la transición energética. Esto podría situarnos en una posición estratégica destacada. Sin embargo, en la actualidad, el país carece del entendimiento y conocimiento necesarios sobre su potencial para producir estos elementos. Esto está en línea con los objetivos, estrategias y líneas de investigación establecidas en el Programa de Desarrollo Minero 2013-2018 presentado por la Secretaría de Economía. En dicho programa se establece que el Servicio Geológico Mexicano (SGM) debe llevar a cabo actividades de exploración e identificación de yacimientos de tierras raras (Secretaría de Economía, 2014). Además, esta investigación destaca la necesidad de una colaboración formal con el SGM para comprender y estudiar adecuadamente los yacimientos minerales de estos elementos.

2. En segundo lugar, en cuanto a los minerales no metálicos, se observa una situación similar. Aunque México registra un déficit en la balanza comercial de estos productos, el país cuenta con un potencial considerable para aumentar su producción. Por lo tanto, a pesar de la tradición de la nación en el estudio y explotación de minerales metálicos, se recomienda un mayor estudio y comprensión de los depósitos minerales no metálicos disponibles en nuestro territorio.

## 5.3 POTENCIAL DE VALORIZACIÓN DE CANANEA, SONORA

### 5.3.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA

Los jales se presentan como un material fino con coloraciones que van desde anaranjado rojizo en los horizontes más superficiales a colores crema grisáceos en los horizontes que se encuentran a mayor profundidad; las variaciones de color pueden sugerir cambios en las condiciones oxidantes y reductoras, mostrando variaciones que con el tiempo influyen en la movilización de elementos, así como en la formación de minerales secundarios producto de los sulfuros primarios propios del yacimiento.

El análisis granulométrico (Tabla 15) de la muestra compuesta de la zanja de la cancha de béisbol revela que la fracción de 0.42 a 2 mm es predominante, representando aproximadamente el 33% de la muestra total. Le sigue la fracción de 0.037 a 0.074, que constituye el 19%. Es crucial destacar que la fracción mayor a 2 mm contiene granos gruesos de tonalidades marrón oscuro a gris (FIG. 37), con apariencia más densa que las partículas más pequeñas. Debido a estas diferencias, se decidió analizar esta fracción por separado.

TABLA 15 RELACIÓN DE PORCENTAJE POR TAMAÑO DE GRANO EN LA MUESTRA COMPUESTA DE ZANJA 1 COMPUESTA DE LA CANCHA DE BÉISBOL.

Muestra	Abertura (mm)	Peso (g)	Porcentaje (%)
Zanja 1 Compuesta Ret. #10	2	11	7.45
Zanja 1 Compuesta #40	0.42	49.21	33.31
Zanja 1 Compuesta #60	0.25	10.55	7.14
Zanja 1 Compuesta #100	0.149	11.5	7.78
Zanja 1 Compuesta #200	0.074	17.52	11.86
Zanja 1 Compuesta #400	0.037	28.15	19.05
Zanja 1 Compuesta finos	<0.037	19.81	13.41
	Total	147.74	100

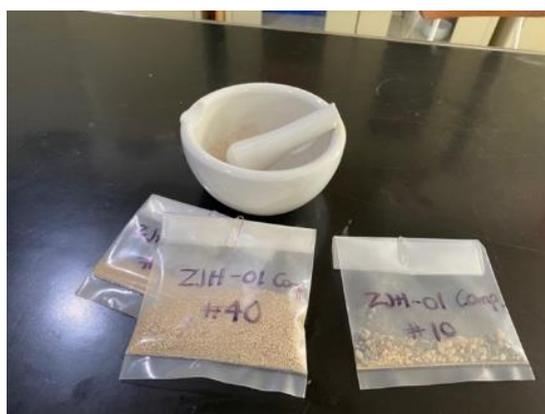


FIG. 37 FRACCIONES POR GRANULOMETRÍA DE MUESTRA COMPUESTA DE ZANJA DE LA CANCHA DE BÉISBOL. DEL LADO DERECHO, SE MUESTRA LA FRACCIÓN MAYOR A 2 MILÍMETROS, LA CUAL PRESENTA GRANOS GRUESOS Y DENSOS DE MATERIALES DIVERSOS.

### 5.3.2 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS Y GEOQUÍMICAS

#### pH y Conductividad Eléctrica

De acuerdo con los resultados de pH y Conductividad Eléctrica (CE) (Tabla 16), los jales presentan pH ácido, con valores mínimos de 2.52 en los jales del vivero y con valores máximos en la cancha de béisbol de hasta 5.44. Los resultados no presentan una tendencia marcada en relación con la profundidad, además, es evidente que la presencia de componentes neutralizadores no ha sido suficiente para elevar los bajos valores del pH. Por otro lado, en el caso de la CE los valores varían desde 0.11 hasta valores muy altos de 5.05 mS/cm, presentando las conductividades más elevadas en los jales del vivero, sin embargo, tampoco se aprecia alguna tendencia clara relacionada a la profundidad de las muestras.

TABLA 16 RESULTADOS DE PH Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE LOS JALES HISTÓRICOS (SUPERFICIALES Y EN ZANJAS) AL NORTE DE CANANEA, SONORA.

Campo y profundidad (cm)	pH	CE
		mS/cm
Zanja 1, béisbol (0-5)	4.39	0.962
Zanja 1, béisbol (100-150)	4.11	0.1662
Zanja 1, béisbol (150-200)	5.44	0.1092
Zanja 5, béisbol (0-25)	3.1	2.72
Zanja 5, béisbol (50-100)	3.41	0.531
Zanja 2, vivero (0-25)	2.57	3.15
Zanja 2, vivero (80-100)	2.52	5.05
Zanja 2, vivero (150-200)	2.58	3.03
Superficial 2, béisbol	4.23	0.922
Superficial 7, béisbol	3.61	2.01
Promedio	<b>3.596</b>	<b>1.86504</b>

### **Geoquímica y enriquecimientos de elementos potencialmente revalorizables**

Los análisis geoquímicos revelaron un enriquecimiento en Cu, Zn, As, Mo, Ag, In, Sn, Sb, W, Pb, Bi, Au, Cd, S, Re y Se (FIG. 38), de acuerdo con las concentraciones de los elementos en la corteza continental superior (UCC por sus siglas en inglés) (Rudnick y Gao, 2003) (ANEXO. 5). Las tierras raras muestran un ligero enriquecimiento, con excepción de Tb, Ta, Hf y Lu. De manera general, la cancha de béisbol presenta mayores concentraciones de los elementos enriquecidos, con exclusión del S y el Re. Por su parte, el elemento que presenta mayor empobrecimiento es el Ge y el Br (únicamente en la cancha de béisbol). Es importante saber, que los jales del vivero son más antiguos que los de la cancha de béisbol, por lo tanto, esta disminución en la concentración de la mayoría de los elementos de interés se deba a dos posibles factores: pérdida por lixiviación de los elementos con el paso el tiempo o por la naturaleza geoquímica de la zona del yacimiento que fue explotada en el momento en el que esos residuos fueron depositados.

Los elementos mayores enriquecidos en ambos sitios de muestreo son el Al, Fe y K. En contraste el Mg, Na, Ca y Ti se ven empobrecidos.

Por otro lado, los enriquecimientos evaluados con respecto a los valores de fondo de la Cuenca Alto de río Sonora presentados por (Calmus et al., 2018) (ANEXO. 6) mostraron tendencias generales similares. Sin embargo, es evidente ver que los siguientes elementos se encuentran enriquecidos con respecto a los valores naturales del sitio: Fe, Cu, Zn, As, Mo, Ag, In, Sn, Sb, W, Pb y Bi (FIG. 39), lo cual se relaciona con el tipo de mineralización presente.

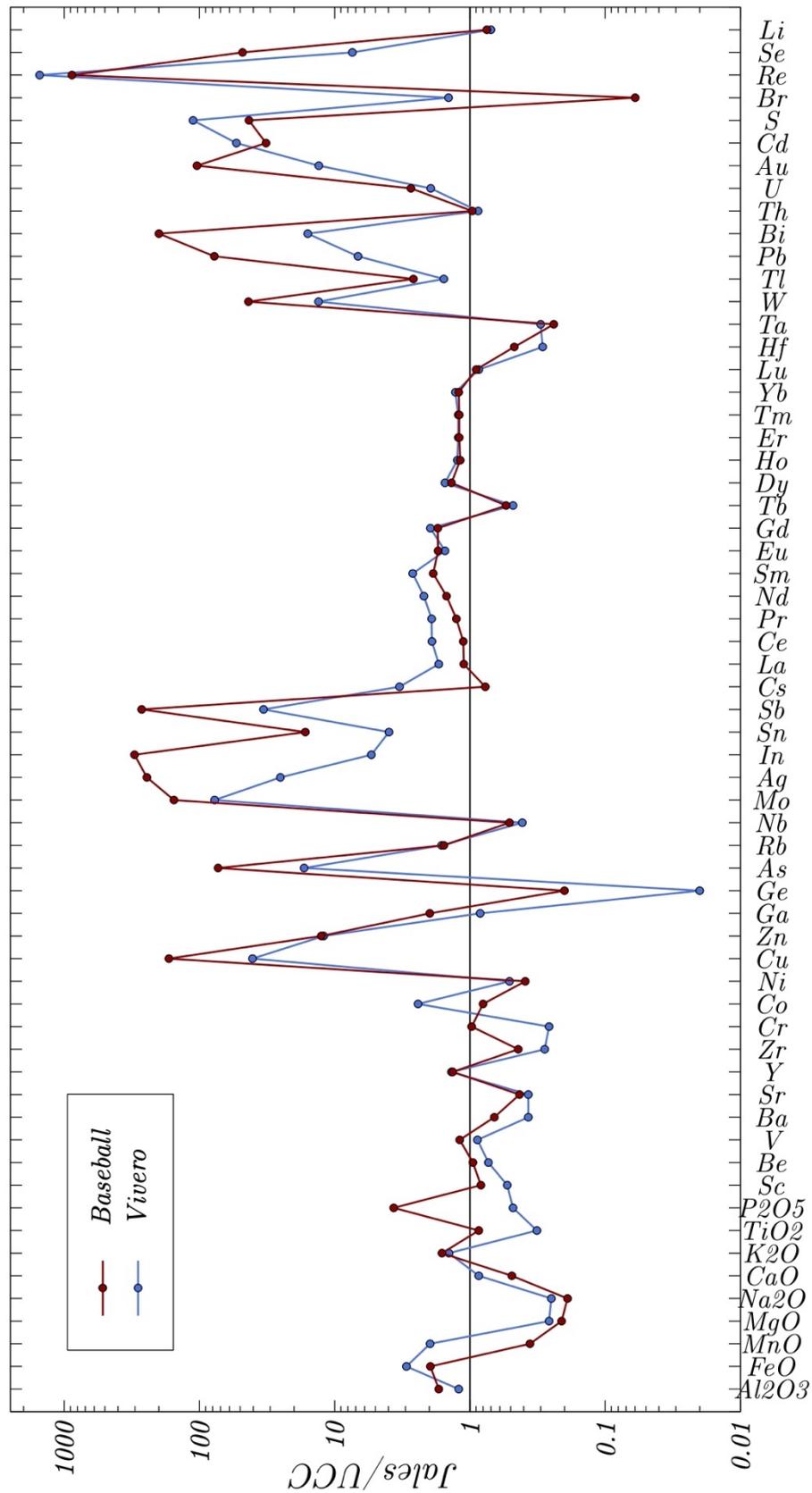


FIG. 38 DIAGRAMA MULTIELEMENTAL QUE MUESTRA LA RELACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE LOS ELEMENTOS EN LOS JALES HISTÓRICOS, NORMALIZADOS CON LAS CONCENTRACIONES EN LA CORTEZA CONTINENTAL SUPERIOR (UCC) (RUDNICK, ET.AL, 2013).

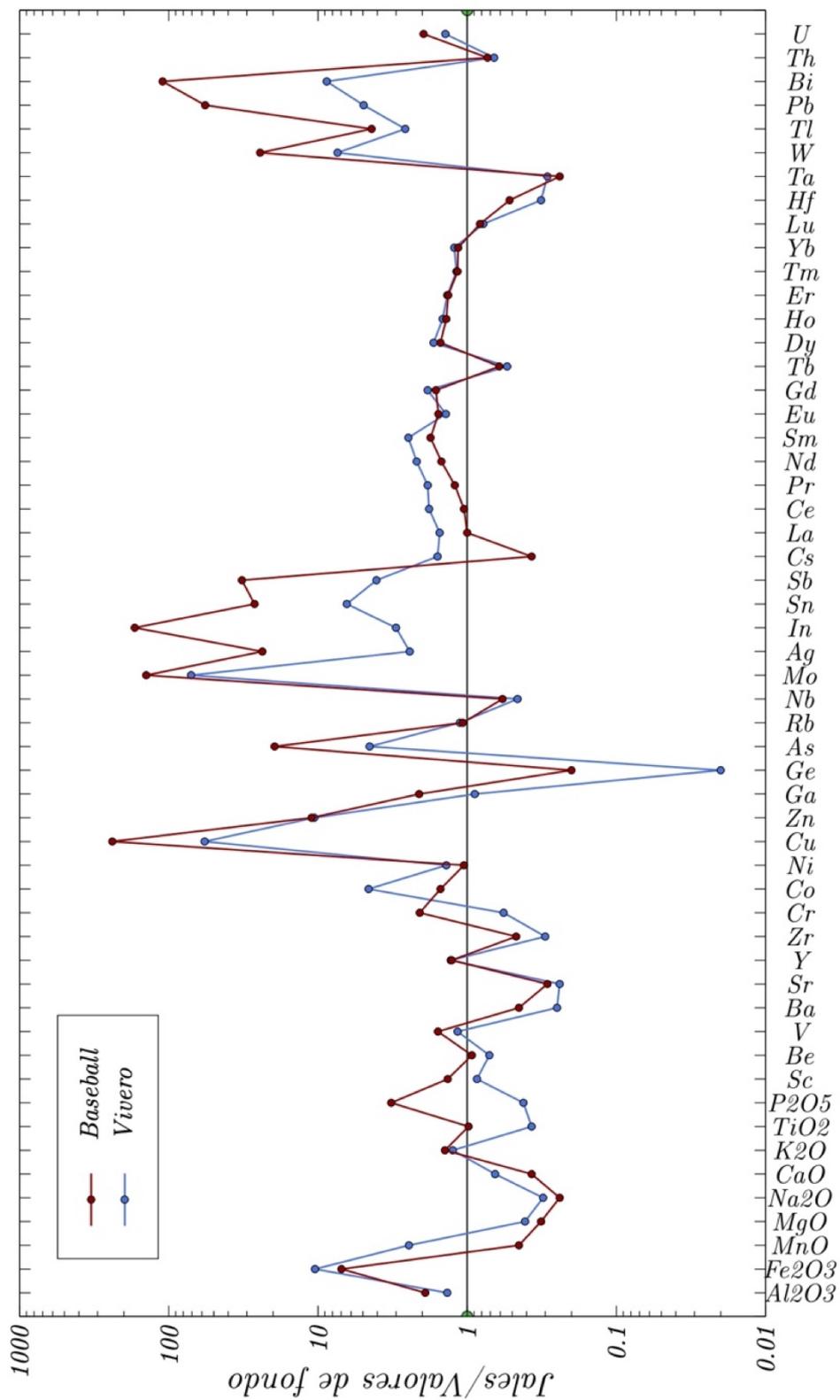


FIG. 39 DIAGRAMA MULTIELEMENTAL QUE MUESTRA LA RELACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE LOS ELEMENTOS DE LOS JALES HISTÓRICOS CON VALORES DE FONDO DEL SITIO, TOMADOS DE CALMUS ET AL. (2018).

Para el análisis de la evaluación de la concentración y potencial económico de las tierras raras (REE, por sus siglas en inglés), se utilizó la sumatoria de los óxidos de las tierras raras (REO) más el itrio (TREO) (ANEXO. 7). El cual se realizó por medio de la conversión a los óxidos correspondientes, suponiendo que su ocurrencia natural es en estado 3+, con la constante  $REE_2O_3$ , con la excepción de  $Pr_6O_{11}$ ,  $Tb_4O_7$  y  $CeO_2$  para realizar una mejor estimación (Hellman y Duncan, 2018) (ANEXO. 8). A pesar de ello, el contenido de REE en los jales es muy baja y no representan un potencial económico.

De acuerdo con los elementos que presentaron un enriquecimiento con respecto a los valores de la UCC y los valores de fondo de la zona, se compararon las concentraciones de los elementos con las leyes de corte reportadas en diferentes proyectos mineros. En consecuencia, el número de elementos con un potencial económico se reduce únicamente a Cu, Re y Ga (Tabla 17), esto es por estar por encima de las leyes de corte reportadas o cercanos a ellas. Por ello, es importante entender la mineralogía de éstos para así determinar si es factible o no su recuperación. Estos resultados concuerdan con el estudio de Alvirde Meléndez (2024) que presenta al Cu con un potencial de ser valorizado, sin embargo, el Mo no presentó concentraciones suficientes para esa clasificación en esta investigación.

Pese a estos resultados, es esencial tomar en consideración que la ley de corte tiene una naturaleza dinámica, ya que depende de factores propios de cada yacimiento, de los costos operación, de la infraestructura y del mercado de los metales. En el caso de los jales con una visión de revalorización, el material ya ha pasado por diferentes procesos físicos y químicos, a diferencia de cuando se tienen en un yacimiento mineral virgen, por lo tanto, costos de molienda o de explotación no son considerados, reduciendo costos tanto en el minado como en procesamiento.

TABLA 17 CONCENTRACIONES DE ELEMENTOS ENRIQUECIDOS Y LEYES DE CORTE EN JALES DE CANANEA, SONORA.

Elemento	Concentración promedio en jales (ppm)	Ley de corte (ppm)
Fe	115700	150000 (Peña colorada, Colima) (ArcelorMittal, 2022)
<b>Cu</b>	<b>2817</b>	<b>700</b> <b>(Buenavista del Cobre, Sonora)</b> (Golder Associates USA Inc., 2022)
Zn	699.10	20000 (Buenavista Zn, Sonora)
Mo	118.30	300 Endako Molybdenum Mine, Canada (Marek, 2011)
Ag	7.52	95 Cusi, Chihuahua (Metals S. , 2020)
Sn	23.10	7000 (Metals L. X., 2020)
Pb	755.12	30000 (AMC Mining Consultants, 2019)
Bi	18.07	108 como subproducto con Ley de corte de WO <sub>3</sub> (Deady et al., 2022)
<b>Re</b>	<b>0.2</b>	<b>0.32</b> <b>Subproducto del concentrado de la molibdenita</b> (Northern Dynasty Minerals, 2020)
<b>Ga</b>	<b>24.62</b>	<b>30</b> (Foley, Jaskula, Kimball, & Schulte, 2017)
TREO (%)	0.0272	0.2 (%) (Geoscience Australia, 2023)

### Geoquímica y correlación de los elementos por fracción

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis de FRX de las fracciones (Tabla 18) se puede observar un comportamiento anómalo de algunos elementos como molibdeno (Mo), zinc (Zn), hierro (Fe), manganeso (Mn) y cromo (Cr), ya que se aprecia una concentración en la fracción gruesa, lo que puede explicar la coloración oscura y los fragmentos de mayor dureza identificados en la separación física. En el caso de el arsénico (As) y el plomo (Pb) se tiene la mayor concentración en la fracción más fina con tamaño <0.037 mm, y en el caso del cobre (Cu), no

presenta alguna tendencia relaciona con el tamaño de partícula a pesar de que la mayor concentración se presenta en la fracción más fina.

TABLA 18 RESULTADOS DEL ANÁLISIS POR FRX DE LA MUESTRA COMPUESTA DE ZANJA EN LA CANCHA DE BÉISBOL, POR FRACCIÓN DETERMINADA POR GRANULOMETRÍA.

LD (mg/kg) Clave de muestra	15 mg/kg	20 mg/kg	20 mg/kg	25 mg/kg	35 mg/kg	100 mg/kg	85 mg/kg	85 mg/kg
<b>Elemento</b>	<b>Mo</b>	<b>Pb</b>	<b>As</b>	<b>Zn</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr</b>
Zanja 1 Comp. >2 mm	1743.55	457.98	437.57	2016.97	5010.35	167836.67	992.95	627.11
Zanja 1 Comp 0.42-2 mm	87.75	1422.78	413.73	709.74	6458.12	36033.33	232.19	169.05
Zanja 1 Comp 0.25-0.42 mm	49.84	1226.93	353.74	468.55	3789.51	33590.00	183.34	126.01
Zanja 1 Comp 0.149-0.25	41.83	1186.97	323.48	415.76	3543.50	34440.00	198.56	123.78
Zanja 1 Comp 0.074-0.149	36.00	1113.18	286.31	419.24	3027.55	30706.67	154.54	103.75
Zanja 1 Comp 0.037-0.074	36.69	1281.27	338.15	718.31	4473.51	31786.67	201.22	114.75
Zanja 1 Comp <0.037 mm	52.16	1805.57	501.95	928.95	7475.75	38900.00	267.25	147.18

La correlación entre elementos muestra relaciones elevadas entre varios elementos, llegando a concluir que se tiene la presencia de 3 grupos principales (Tabla 19), los cuales son:

1. Fe, Mo, Zn, Mn y Cr.
2. Cu y As con correlaciones bajas con el primer grupo y medias con el Pb.
3. El Pb con sus correlaciones negativas con el primer grupo y medias con el segundo grupo.

Estos tres grupos de asociación en las concentraciones de los metales pueden ser de utilidad para la determinación de las especies mineralógicas.

TABLA 19 CORRELACIÓN ENTRE ELEMENTOS POR GRANULOMETRÍA DE MUESTRA DE ZANJA DE LA CANCHA DE BASEBALL EN CANANEA, SONORA.

	Mo	Pb	As	Zn	Cu	Fe	Mn	Cr
Mo	1							
Pb	-0.8177353	1						
As	0.35628316	0.23903737	1					
Zn	0.9444663	-0.60112	0.59940138	1				
Cu	0.06755122	0.49486398	0.92023135	0.35801915	1			
Fe	0.99900443	-0.7959391	0.38929035	0.95252427	0.09671259	1		
Mn	0.99417647	-0.7543948	0.44724075	0.97028792	0.1638591	0.99735454	1	
Cr	0.99601193	-0.7761448	0.42311709	0.95795754	0.14460327	0.9969447	0.99705102	1

En la gráfica (FIG. 40) se observa el comportamiento similar de las concentraciones en las diferentes fracciones, del primer grupo de elementos (Mo, Zn, Mn y Cr), el As con una baja variación, pero ligera similitud con el Cu y el Pb con una tendencia diferente a los demás metales. Gracias a estas correlaciones se llega a la conclusión de que la fracción gruesa presenta partículas metálicas conformadas principalmente por Fe, lo cual pudiera deberse a la presencia de algún residuo proveniente de un proceso de fundición que pueda haberse mezclado con los jales antiguos; el gran contraste que existe entre esta fracción gruesa con las demás, tiene que ser estudiada principalmente en el sitio para comprender el posible origen de estas partículas metálicas.

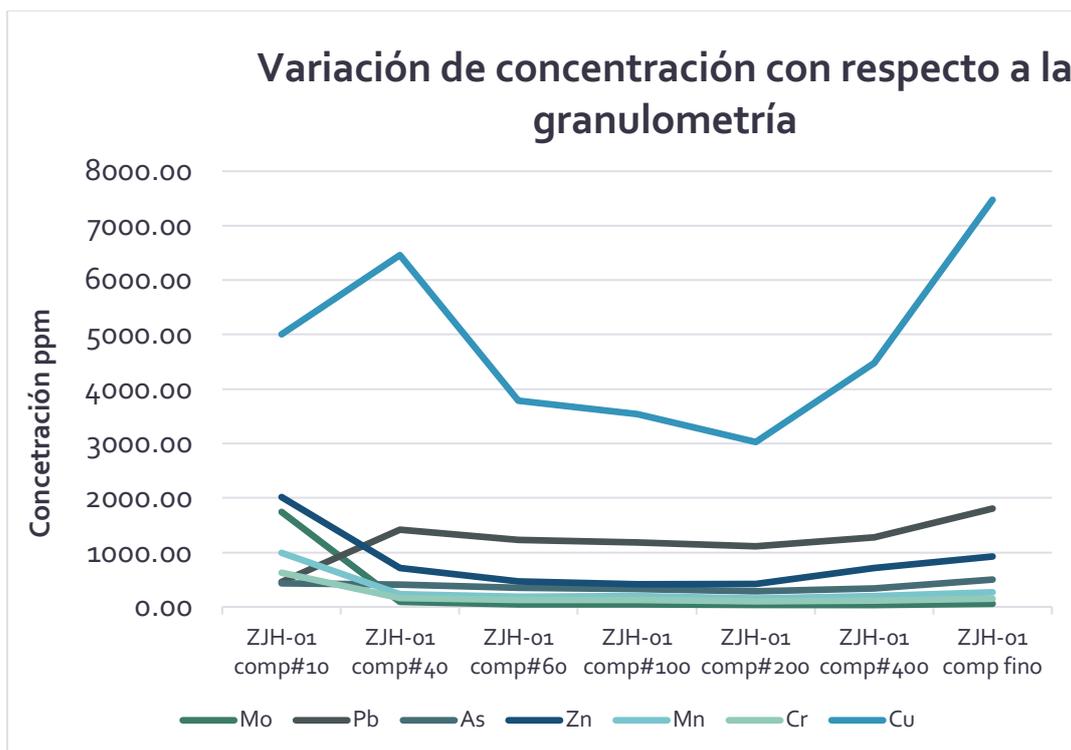


FIG. 40 CORRELACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE LOS METALES EN LA FRACCIÓN GRUESA.

### 5.3.3 MINERALOGÍA

#### Difracción de Rayos X (DRX) de jales en zanjas a diferentes profundidades

Los minerales más abundantes en los jales son el cuarzo, la caolinita (arcilla), el yeso (sulfato hidratado), el clinocloro (aluminosilicato) y la sanidina (feldespato) (Tabla 20). Sin embargo, además de estos minerales, se tiene presencia de otras arcillas, micas, hidróxidos de Fe, sulfatos de Fe. Gracias a esta gran variedad de especies identificadas es evidente resaltar que, durante el tiempo de exposición en condiciones atmosféricas, los residuos han presentado cambios químicos que han dado origen a diferentes minerales secundarios.

Además, de acuerdo con los resultados de la DRX (ANEXO. 9, ANEXO. 10, ANEXO. 11, ANEXO. 12, ANEXO. 13, ANEXO. 14 y ANEXO. 15) no se pudieron detectar minerales primarios de Cu, Ga (incluyendo la esfalerita) o Re (incluyendo la molibdenita). Dado a esto, la ocurrencia de los elementos puede ser como una impureza en otros minerales, que las concentraciones se encuentren por debajo del límite de detección de la técnica o que se encuentren relacionados con minerales pobremente cristalinos. Esto, resalta la relevancia de las arcillas, oxi-hidróxidos de Fe

y sulfatos de Fe, para comprender los procesos que pudieron haber retenido a los elementos de interés económico.

TABLA 20 MINERALES PRESENTES EN LOS JALES DE CANANEA, SONORA; DE ACUERDO CON LOS RESULTADOS DE DRX DE LAS MUESTRAS DE ZANJAS A DIFERENTES PROFUNDIDADES.

Mineral	Fórmula
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>
Caolinita	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>
Yeso	CaSO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O
Montmorillonita	(Na,Ca) <sub>0.33</sub> (Al,Mg) <sub>2</sub> (Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>2</sub> · nH <sub>2</sub> O
Dickita	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>
Clinocloro	(Mg,Fe <sup>2+</sup> ) <sub>5</sub> Al((OH) <sub>8</sub> /AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )
Sanidina	(K,Na)(Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>8</sub>
Moscovita	KAl <sub>2</sub> (AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>2</sub>
Jarosita	KFe <sub>3</sub> (OH) <sub>6</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> .
Goethita	FeO(OH)
Mica	
Plumbogumita	PbAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> )(PO <sub>4</sub> )(OH) <sub>6</sub>
Lepidocroita	FeO(OH)
Ortoclasa	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>

### DRX zanja compuesta. Fracción >2mm y fracción entre 0.037-0.074 mm

La fracción más gruesa presenta más fases minerales y mayor cantidad de minerales amorfos que la fracción de la malla #400 (0.037-0.074 mm) (ANEXO. 17). En las partículas mayores a los 2mm (ANEXO. 16) se presentan minerales como la trevorita (óxido de Fe), la fayalita (silicato de Fe), la rusakovita (fosfato de Fe y Al) y un sulfato de (Co y Fe); por lo que se reflejan las altas concentraciones de Fe y otros metales relacionados. Por otro lado, la fracción fina contiene minerales como la caolinita (arcilla), el diópsido sódico (piroxeno), una pequeña fracción de haloisita (aluminio silicato) y menor cantidad de amorfos, coincidiendo con la mineralogía general determinada en la zanja (Tabla 21).

TABLA 21 MINERALES PRESENTES EN LOS JALES DE CANANEA, SONORA; DE ACUERDO CON LOS RESULTADOS DE DRX DE LAS FRACCIONES >2MM Y 0.37-0.074 MM.

Tamaño de partícula	Mineral	Fórmula
>2mm	Fayalita Rusakovita Trevorita Sulfato de Co y Fe Cuarzo	$(\text{Fe}^{2+})_2\text{SiO}_4$ $(\text{Fe}^{3+},\text{Al})_5(\text{VO}_4,\text{PO}_4)_2(\text{OH})_9 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ $\text{NiFe}^{3+}_2\text{O}_4$ $(\text{Co},\text{Fe})\text{SO}_4$ $\text{SiO}_2$
0.037-0.074	Cuarzo Caolinita Diópsido Halloysita	$\text{SiO}_2$ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ $\text{MgCaSi}_2\text{O}_6$ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

### Mapeos elementales

#### Galio

El primer elemento analizado fue el Ga; como se puede observar en las dos imágenes (FIG. 41), en ambas fracciones este elemento se presenta disperso y, por lo tanto, no presenta espacialmente una asociación con otros elementos que puedan determinar una especie mineral. En cuanto a las diferentes fracciones analizadas, se muestra ligeramente más abundante en la fracción gruesa (#10).

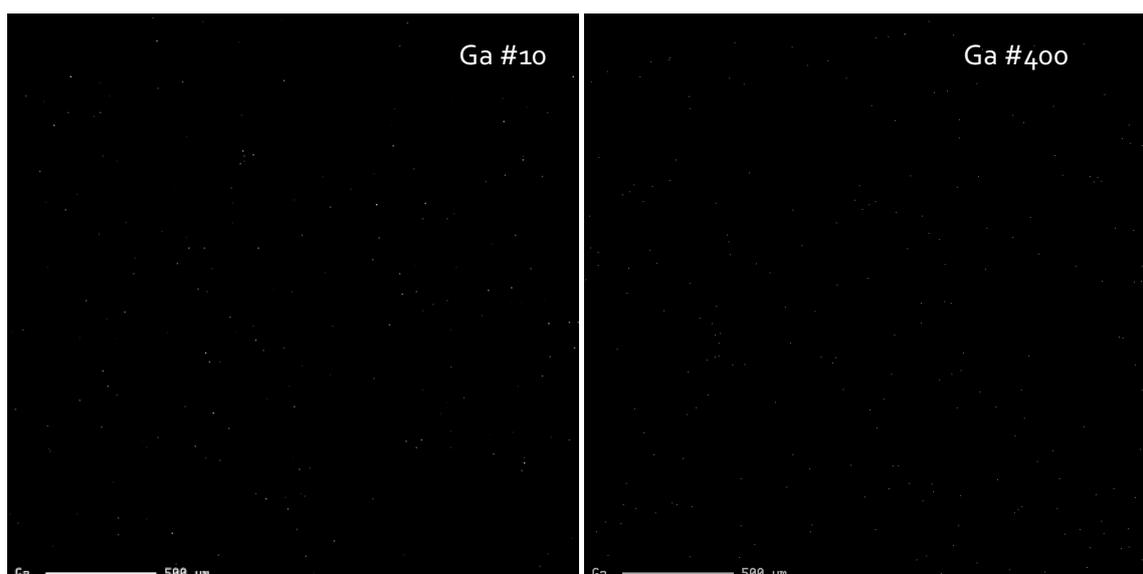


FIG. 41 MAPEOS ELEMENTALES DEL GA, FRACCIONES MALLA 10 Y 400.

Dado a que la formación recabada no permite determinar una especie mineralógica que contenga Ga, es necesario analizar los procesos que pudieron haber ocurrido en el medio para que el elemento se encuentre en las concentraciones que se tiene. Por esa razón, de acuerdo con los minerales caracterizados por la DRX, procesos de sorción pudieron haber ocurrido para retener al Ga en los sólidos presentes.

De acuerdo con la especiación química del Ga(III) realizada por los autores (Luong y Liu, 2014), la especie más abundante que se presenta en un medio con pH inferior a 2 es el  $\text{Ga}^{3+}$ , la otra especie presente es  $\text{Ga}(\text{OH})_2^+$  la cual tiene una presencia mayor al 50% cuando el pH se encuentra a 2.93; al aumentare el pH hasta un 3.86 el  $\text{Ga}(\text{OH})_2^+$  la principal fuente del Ga (III) soluble. En contraste, al aumentar el pH aparecen las especies neutras  $\text{Ga}(\text{OH})_3^0$  y las negativas  $\text{Ga}(\text{OH})_4^-$  tienen su aparición máxima en pH de 5.35 y >9 respectivamente. Por esta razón, puede pensarse que en un medio ácido como en los jales estudiados, las especies presentes tengan mayormente una carga positiva en solución.

Considerando que las especies de Ga que pueden presentarse tienen una carga positiva, un mecanismo de sorción podría ser posible por las arcillas que se presentan en los jales, tal como la montmorillonita, la caolinita, la dickita o la halloysita debido a la carga negativa permanente que tienen o por la carga variable dependiente del pH.

El Punto de Carga Zero (PCZ) de la montmorillonita calculada por los autores (Ijagbemi et al., 2009) es de  $3.4 \pm 2$ , por lo tanto, al tener condiciones más ácidas se ha podido observar menor sorción de cationes, en contraste, al incrementar el pH los autores han podido concluir que a partir del PCZ aumenta la sorción de cationes. En el caso de la Caolinita, presenta un PCZ cercano a 3 (Tschapek et al., 2018). Por ello, se puede pensar que el Ga pudo haber sido sorbido por alguna de las arcillas presentes, probablemente por la caolinita al ser la más abundante. En el caso de la goetita, se ha reportado en la literatura un PCZ alrededor de 9 con una superficie específica de  $95 \text{ m}^2/\text{g}$ , por ello, se puede pensar que en condiciones ácidas como las que se tiene en el medio de estudios, este mineral presenta una carga superficial positiva (Gaboriaud y Ehrhardt, 2003) por lo que se pensaría que no pudo haber ocurrido una sorción en su superficie.

Por otro lado, es necesario analizar la posibilidad de que la sorción pueda haber ocurrido en otras superficies tal como en los oxi-hidróxidos de Fe, ya que este tema sigue en desarrollo y el entendimiento a detalle de las características de diversos materiales puedan ser la respuesta de los procesos ocurridos en el residuo. Tal es el caso de la investigación realizada por los autores Persson et al. (2006) que identificaron la sorción del Ga(III) por medio de la formación de complejos en sitios superficiales de Fe.

En conclusión, el estudio a detalle de las arcillas presentes y de los oxi-hidróxidos de Fe es necesario para poder comprender la posible asociación del Ga con estos minerales y así, determinar la posibilidad de su procesamiento.

### Renio

El renio, es conocido como subproducto de la molibdenita; en pórfidos de Cu con concentraciones de <10 ppm a porcentajes en peso. Sin embargo, este escaso metal en la corteza terrestre, también se ha identificado en otros sulfuros, tales como: pirita, calcopirita, bornita y esfalerita en concentraciones de <1 a 100 ppb (John y Taylor, 2016).

De acuerdo con los resultados de los mapeos elementales, el Mo se encuentra disperso en ambas fracciones y, por lo tanto, no refleja partículas que puedan definir una mineralogía clara y, en consecuencia, no muestra una asociación del Re con la molibdenita, ya que el Re se identificó en partículas definidas que no se relacionan con el Mo (FIG. 42).

Sin embargo, al analizar la ocurrencia del Zn y el Re, ambos metales presentan una muy alta relación espacial, por lo que se les asocia en partículas definidas. Asimismo, la concordancia con el azufre se presenta en la mayoría de las partículas que presentan ambos metales, por lo que se puede concluir que se tiene un sulfuro de Zn, siendo la esfalerita el mineral identificado.

Aun así, la presencia de otros sulfuros tales como la pirita y la calcopirita en el yacimiento, puedan ser clave para entender la asociación del renio. Sin embargo, es

probable que por las bajas concentraciones de Re en ellos no hayan podido ser identificados o que no se presenten en esos sulfuros.

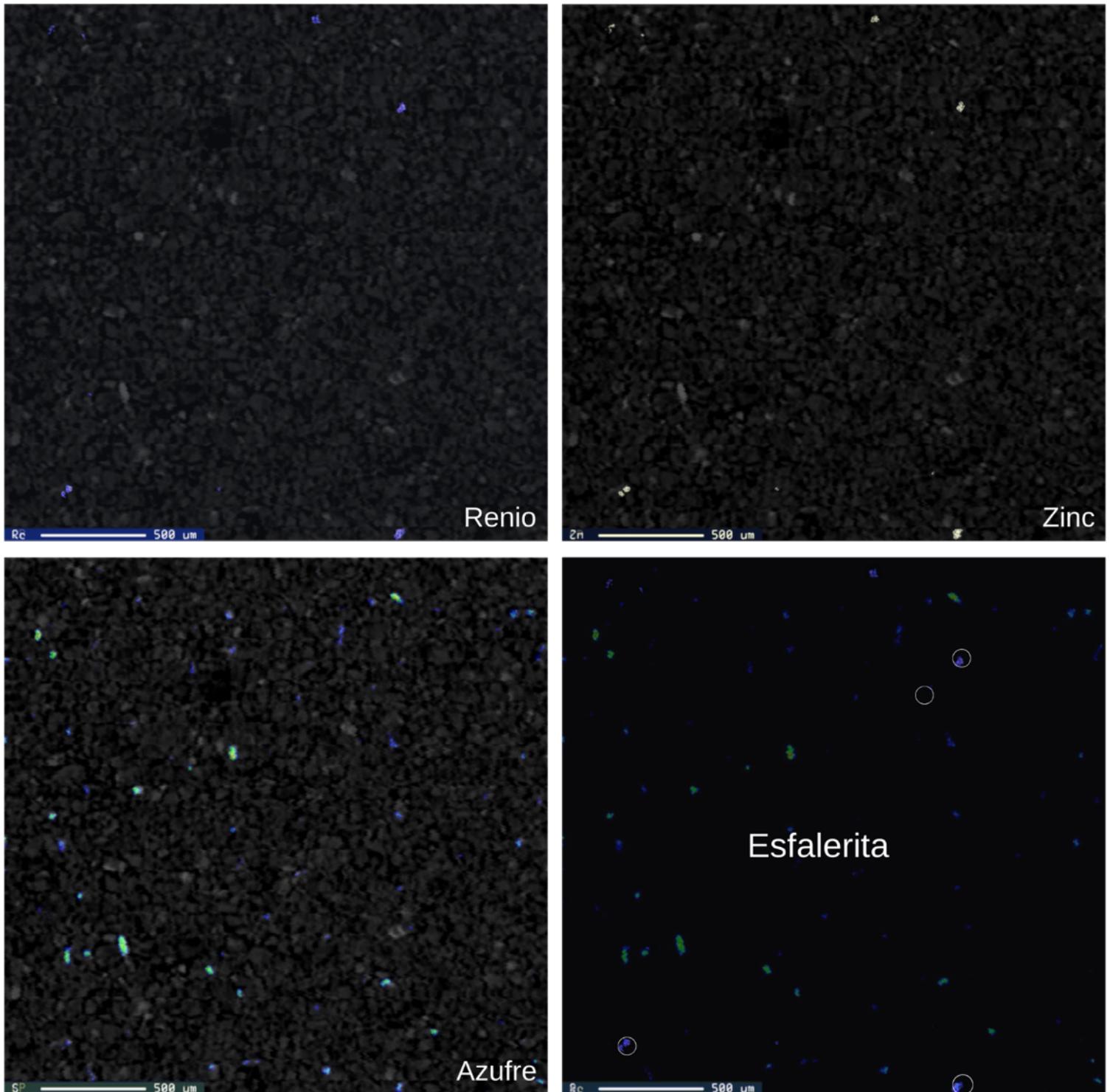
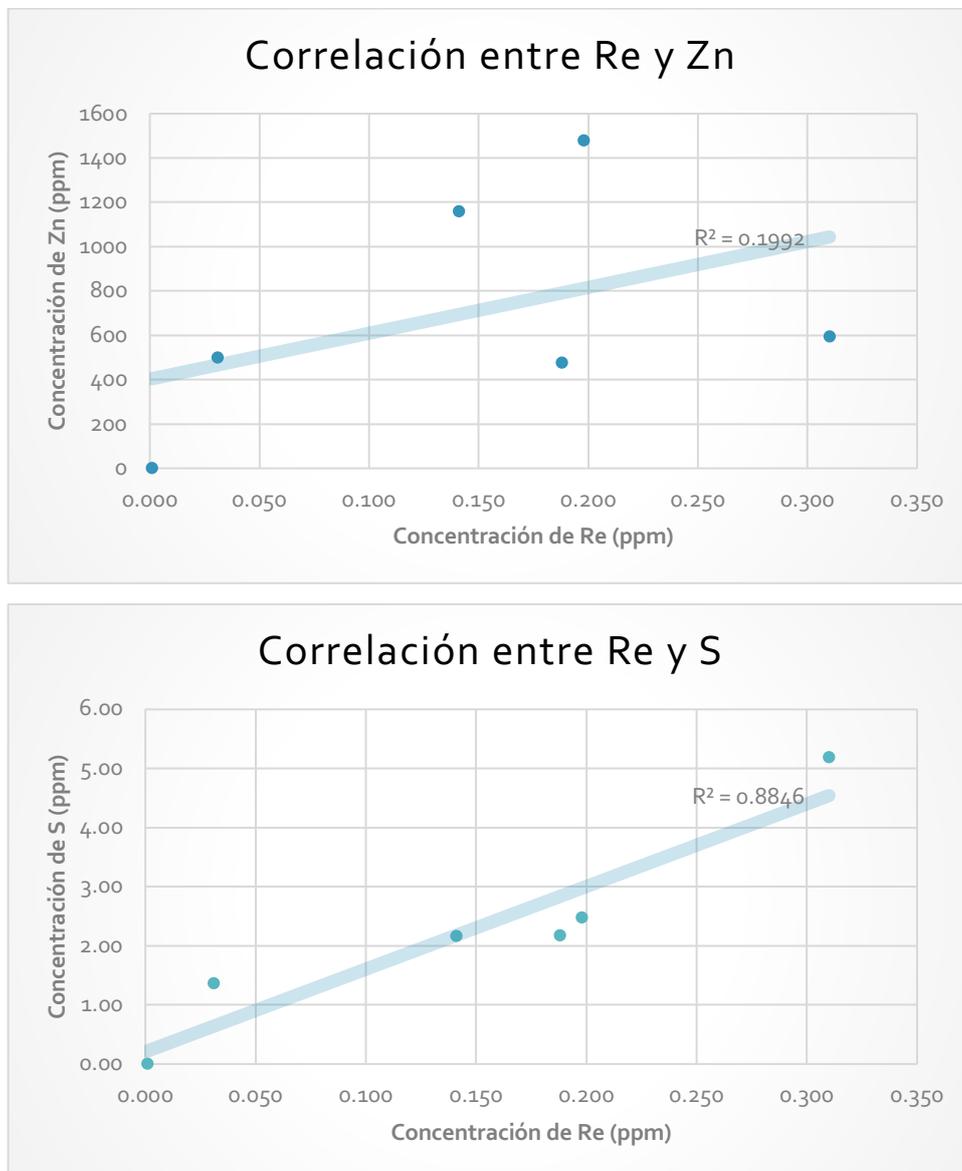
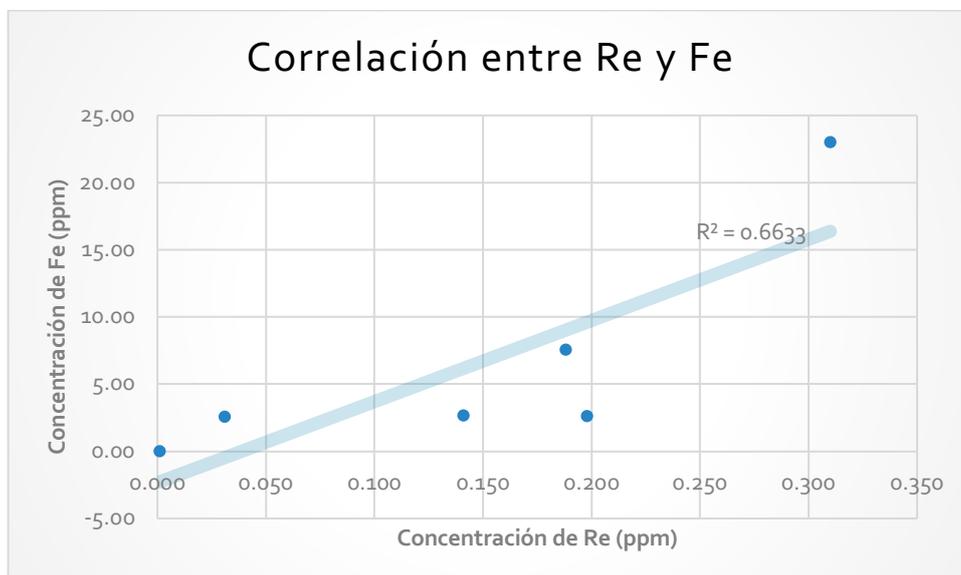
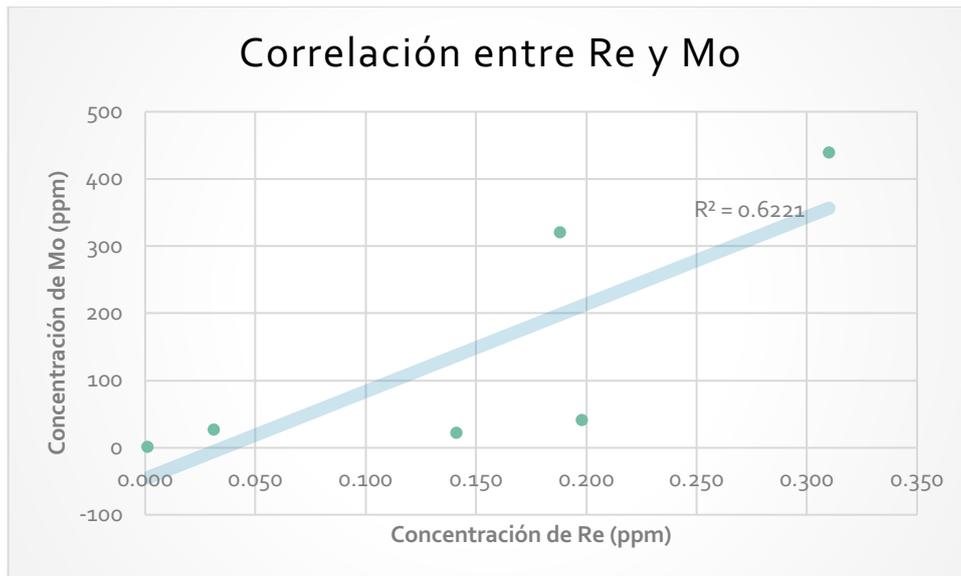


FIG. 4.2 MAPEOS ELEMENTALES DEL RENIO, ZINC Y AZUFRE. LOS MAPEO MUESTRAN LA RELACIÓN ENTRE LOS ELEMENTOS, REVELANDO LA PRESENCIA DE UN SULFURO DE ZINC, IDENTIFICADO COMO ESFALERITA.

Por otro lado, la correlación entre el Re y el S, Fe y Zn (FIG. 43) mostró algo totalmente diferente a lo que se puede concluir con los mapeos elementales. El Re muestra un coeficiente de correlación de 0.45 con el Zn siendo un valor bajo, sin embargo, los coeficientes de correlación con el S, Mo y Fe son 0.94, 0.79 y 0.81 respectivamente. Por ello es claro que por estos resultados el renio se encuentra asociado con algún o algunos sulfuros, además de ello, la correlación es mayor con el Mo y con el Fe, que, con el Zn, por lo que podría pensarse que la mayor concentración de renio se encuentre en otros sulfuros que no se han podido identificar.

FIG. 43 CORRELACIÓN ENTRE EL RENIO, ZINC, AZUFRE, HIERRO Y MOLIBDENO, EN LOS JALES DE LA CANCHA DE BEISBOL.





Debido a la información obtenida, se recomienda realizar una separación de los sulfuros presentes en el residuo minero, ya sea por medio de flotación como comúnmente se lleva a cabo su separación o por el empleo de técnicas de separación física, tales como separación por densidad. De este modo, profundizar en el entendimiento de la asociación del renio con los sulfuros presentes puede llevar a la selección de una técnica que permita su recuperación.

#### Cobre

En el caso del cobre, los mapeos elementales (FIG. 44) muestran 3 tipos de asociaciones del cobre: en primer lugar, se puede ver en la imagen que se tienen sulfuros de Cu y Fe o calcopirita; en segundo lugar, se tiene al Cu compartiendo

partículas con el S, las cuales son identificadas como sulfatos debido a la poca la tonalidad de las partículas (opaca) en la imagen obtenida y por último, se tienen partículas en dónde se identificó únicamente al Cu, por lo que podría pensarse que el elemento se presenta como óxidos de Cu.

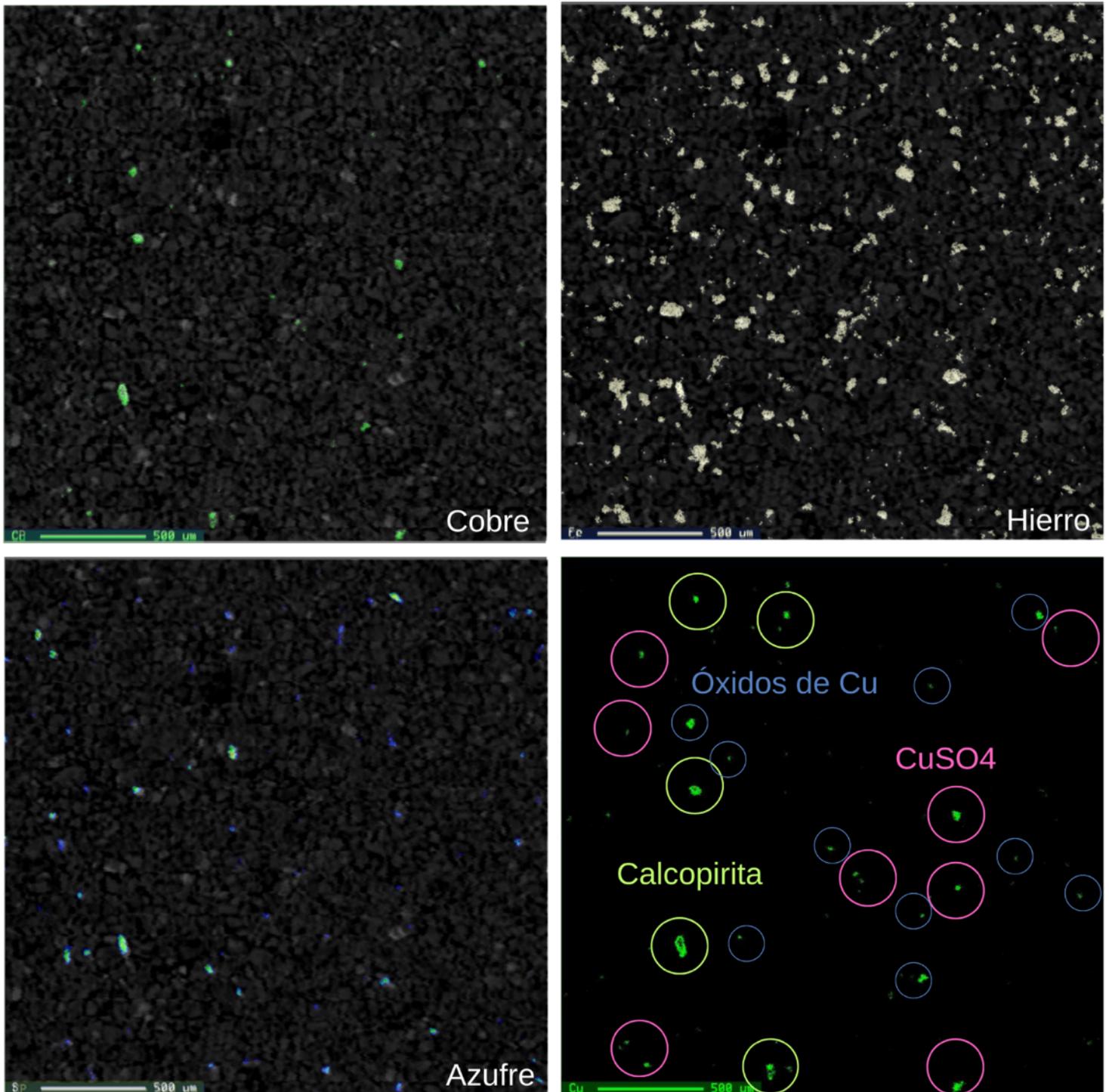


FIG. 44 MAPEOS ELEMENTALES DE COBRE, HIERRO Y AZUFRE. ADEMÁS, SE PRESENTAN LAS ESPECIES IDENTIFICADAS.

Según estos resultados, es evidente que el cobre no se presenta en una sola especie. Por ello, se puede explicar los resultados obtenidos por el autor Alvirde Meléndez (2024), quien al emplear una técnica ácida para recuperar el metal logra un 64% de recuperación. Aunque estos porcentajes resultan económicos, existen pérdidas del cobre total en los jales debido a las diversas especies químicas presentes que contienen al cobre.

La presencia de sulfatos solubles en agua se atribuye principalmente a las condiciones climáticas áridas de la zona. La migración capilar del agua hacia la superficie, bajo condiciones de oxidación, facilita la formación de sulfatos como calcantita o bonatita (Dold y Fontboté, 2001), estos sulfatos pueden ser procesados a un costo muy bajo.

En conjunto, la recuperación del 64% de Cu obtenida en el reprocesamiento de los jales en el estudio previamente realizado y los resultados de los mapeos elementales obtenidos en esta investigación, indican la presencia diferentes tipos de minerales que contiene cobre. Esta heterogeneidad en la mineralogía puede verse reflejado en los diferentes porcentajes de recuperación, ya que diferentes técnicas pueden resultar en diferentes tasas de recuperación de Cu en diferentes tipos de minerales. Un ejemplo es la recuperación de Cu en diferentes minerales es la presentada por los autores Little et al. (2018) en el que se analizan diferentes tipos de menas y minerales en circuitos de flotación y en pilas de lixiviación; en el caso de la calcopirita, cuando se emplea la flotación, la recuperación puede variar entre 57% y 94% (dependiendo de la mineralogía de la mena), por otro lado, en un proceso de lixiviación la recuperación de Cu más alta que se obtuvo fue de 37%.

Por esta razón se propone analizar la posibilidad de modificar o posiblemente agregar algún otro paso en el reprocesamiento, enfocándose en la idea de la presencia de sulfuros y posibles óxidos de Cu.

## 5.4 POTENCIAL DE VALORIZACIÓN DE MATEHUALA, SAN LUIS POTOSÍ

### 5.4.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA

Los resultados de la caracterización física (cualitativa) se ven fuertemente marcados por el tipo del material en estudio (Tabla 22). En primer lugar, las escorias son producto del proceso de fundición de Pb. En segundo lugar, los suelos contaminados se encuentran afectados por los polvos de la fundición y los residuos de las antiguas instalaciones donde se llevaba a cabo el proceso.

TABLA 22 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LAS ESCORIAS VÍTREAS Y LOS SUELOS CONTAMINADOS POR POLVOS DE FUNDICIÓN.

<b>Residuo</b>	<b>Características</b>
<b>Escorias</b>	Material de aspecto vítreo color negro a marrón oscuro, con zonas color rojizas. Es un material consolidado que se encuentra dispuesto es una pila de escorias. No muestra crecimiento de vegetación.
<b>Suelos contaminados por polvos</b>	Suelos limo-arcillosos (determinado al tacto en campo) de coloración que varía de las zonas, entre rojiza y marrón oscuro en la superficie, que con la profundidad presenta colores marrones más claros a grises. Presenta gran cantidad de escombros de las edificaciones destruidas y escorias. En algunos puntos se presenta vegetación y raíces, sin embargo, hay puntos muy marcados en donde no existe crecimiento de vegetación.

### 5.4.2 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS Y GEOQUÍMICAS

#### **pH y Conductividad Eléctrica**

Tanto en las escorias como en los suelos contaminados se determinó un pH básico (Tabla 23), sin embargo, el pH en las escorias es ligeramente mayor que en los suelos contaminados, con valores de 8.66 a 9.41; la razón principal es la composición de los materiales; sin embargo, los valores de pH elevados también pueden deberse a que las escorias vítreas son muy estables. Por lo tanto, su interacción con factores climáticos es reducida, ya que el material se muestra homogéneo y no poroso. En contraste, los suelos presentaron valores de pH menores, entre 7.8 y 8.17, ya que, al tratarse de un suelo con cierta porosidad, permite la interacción de fluidos (lluvia y

gases) con los sólidos (suelo y polvos contaminados) aportando acidez y disminuyendo el pH; sin embargo, los valores se mantienen en pH altos debido a la presencia natural de carbonatos en la zona.

En el caso de la Conductividad eléctrica (CE) (Tabla 23) también muestra gran diferencia; al contrario del pH, las escorias muestran valores de CE más bajos que los suelos, entre 0.04739 y 0.07418 mS/cm, lo que puede ser efecto de las mismas razones que en el pH en ellas se mantiene más elevado. Los suelos, por un lado, al ser un sistema abierto, permiten el intercambio de materia y energía, lo que propicia la alteración de los minerales presentes y la liberación de iones. Esto se refleja en valores de CE superiores, que oscilan entre 0.1825 y 2.674 mS/cm. Por otro lado, se encuentran contaminados por el aporte de polvos generados durante las actividades de fundición mientras estaban activas, lo que influye en su composición y sus propiedades químicas.

TABLA 23 VALORES OBTENIDOS DE PH Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN LAS ESCORIAS (EN AZUL) Y LOS SUELOS CONTAMINADOS (EN VERDE) DE MATEHUALA, SAN LUIS POTOSÍ.

		C.E.	
Muestras	Profundidad	pH	mS/cm
22-M-E-03	Superficial	9.41	0.05208
22-M-E-10	Superficial	9.06	0.07657
22-M-EZ-C-02	0-800 Compuesta	8.72	0.05319
22-M-EZ-C-03	0-1000 Compuesta	8.54	0.07418
22-M-EZ-C-04	0-400 Compuesta	8.66	0.04739
Promedio		8.878	0.060682
EF-ZS-01	0-5	7.8	2.674
EF-ZS-07	0-5	8.17	0.2379
EF-ZS-08	5-25	8.16	0.1825
EF-ZS-10	25-50	8.2	0.5569
EF-ZS-11	5-25	7.85	2.502
Promedio		8.036	1.23066

### Geoquímica y enriquecimientos de elementos potencialmente revalorizables

Los resultados de la geoquímica total normalizados con los valores presentes en la Corteza Continental Superior (UCC, por sus siglas en inglés) (FIG. 45), muestran una

ligera predominancia de los elementos mayores en las escorias en comparación con los resultados obtenidos de los suelos contaminados, excepto en el caso del Ca y del Ti. De manera general el Mn y el Ca son los elementos con un enriquecimiento mayor. Por otro lado, en los elementos traza, se aprecia un enriquecimiento importante del Cu, Zn, As, Ag, Sn, Sb, W, Pb, Bi, Cd y Se en ambos medios, sin embargo, en la gran mayoría de ellos, el enriquecimiento es más marcado en los suelos contaminados, con excepción de Zn y el W que se encuentran más abundantes en las escorias. Por último, en el caso de las tierras raras, de manera general ambos residuos se encuentran empobrecidos, con un pico positivo del Eu en las escorias. No obstante, es claro que las escorias presentan ligeramente mayor concentración de tierras raras ligeras y los suelos tierras raras pesadas.

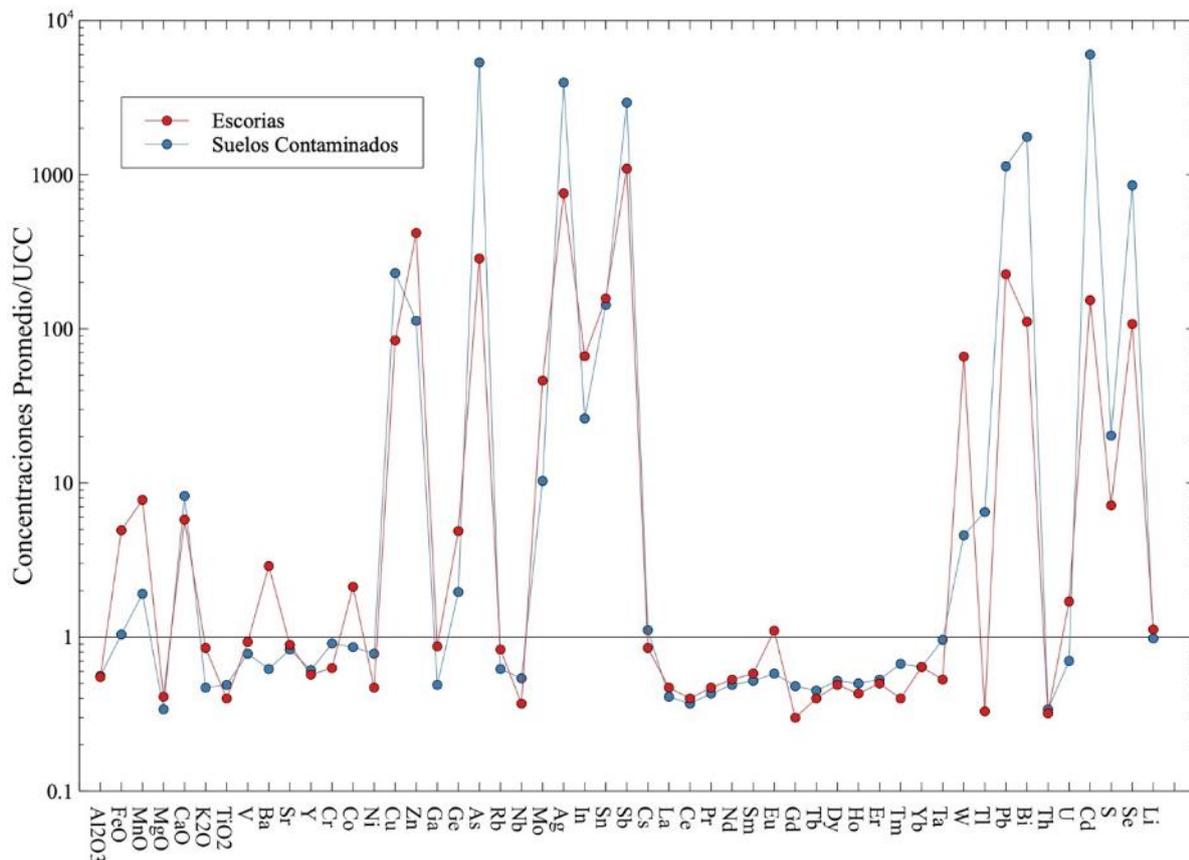


FIG. 45 DIAGRAMA MULTIELEMENTAL, QUE MUESTRA LA REALACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE LAS CONCENTRACIONES EN LAS ESCORIAS Y EN LOS SUELOS CONTAMINADOS DE MATEHUALA, NORMALIZADOS CON LAS CONCENTRACIONES EN LA CORTEZA CONTINENTAL SUPERIOR (UCC) (RUDNICK, ET.AL, 2013).

Los enriquecimientos obtenidos, al ser comparados con las leyes de corte de diferentes yacimientos minerales, redujeron el número de metales con potencial de revalorización. Por lo tanto, los elementos a analizar son: para las escorias, el Cu y el Zn (Tabla 24), debido a que presentan valores más elevados a las leyes de corte de referencia, sin embargo, también se estudiará la Ag, dado de que algunos yacimientos en México se reportan leyes de hasta 50 ppm. Asimismo, para los suelos contaminados, se presentó mayor enriquecimiento en más elementos, por lo que aquellos a estudiar son: Cu, Ag y Bi (Tabla 25). Los valores de la concentración de todos los elementos se encuentran en (ANEXO. 20, ANEXO. 21 y ANEXO. 22).

TABLA 24 CONCENTRACIONES DE ELEMENTOS ENRIQUECIDOS Y LEYES DE CORTE EN ESCORIAS DE MATEHUALA, SAN LUIS POTOSÍ.

<b>Elemento</b>	<b>Concetración Escorias (ppm)</b>	<b>Ley de corte (ppm)</b>
<b>Cu</b>	2354.00	<b>700</b> <b>(Buenvista del Cobre, Sonora)</b> (Golder Associates USA Inc., 2022)
<b>Zn</b>	28040.00	20000 (Buenvista Zn, Sonora)
<b>Mo</b>	50.80	300 Endako Molybdenum Mine, Canada (Marek, 2011)
<b>Ag</b>	40.13	95 Cusi, Chihuahua (Metals S. , 2020)
<b>Bi</b>	17.80	108 como subproducto con Ley de corte de $WO_3$ (Deady et al., 2022)

TABLA 25 CONCENTRACIONES DE ELEMENTOS ENRIQUECIDOS Y LEYES DE CORTE EN SUELOS CONTAMINADOS DE MATEHUALA, SAN LUIS POTOSÍ.

Elementos	Concentración Suelos C. (ppm)	Ley de corte (ppm)
Cu	6438.17	700 (Buenavista del Cobre, Sonora) (Golder Associates USA Inc., 2022)
Zn	7560.00	20000 (Buenavista Zn, Sonora)
Mo	11.33	300 Endako Molybdenum Mine, Canada (Marek, 2011)
Ag	209.92	95 Cusi, Chihuahua (Metals S. , 2020)
Bi	281.33	108 como subproducto con Ley de corte de $WO_3$ (Deady et al., 2022)

#### 5.4.2 MINERALOGÍA

##### Escorias

Como es evidente en el difractograma de las escorias, no se pueden ver claramente las fases cristalinas, debido a sus bajas señales que se confunden con la señal de fondo (FIG. 46 y FIG. 47), lo cual complicó la determinación de las especies minerales; esto se debe a la naturaleza vítrea del residuo, en el cual, predominan los materiales poco cristalinos o amorfos. Por lo tanto, es necesario emplear otras técnicas que permitan identificar y analizar mejor las fases minerales presentes.

A pesar del gran contenido de amorfos, se identificó una fase mineral de uno de los dos elementos de interés económico (Cu) (Tabla 26); la planerita es un fosfato de Cu, siendo este un posible mineral para análisis a pesar de su baja concentración. Por otro lado, los minerales que predominan en las escorias son el diópsido  $MgCaSi_2O_6$  y el clinopiroxeno  $(Ca,Mg,Fe,Mn,Na,Li)(Al,Mg,Fe,Mn,Cr,Sc,Ti)(Si,Al)_2O_6$ , ambos silicatos; siendo la presencia de las demás especies identificadas en muy bajas concentraciones. Por último, se determinó la presencia de galena (sulfuro de Pb).

Sample: LGA-717-22-film Lambda= 1.78897

Date: 15/03/2023 · XPowder Ver. 2010.01.35 · e\_mail: support@xpowder.com http://www.xpowder.com · License to \inXitu Inc:Inner Use

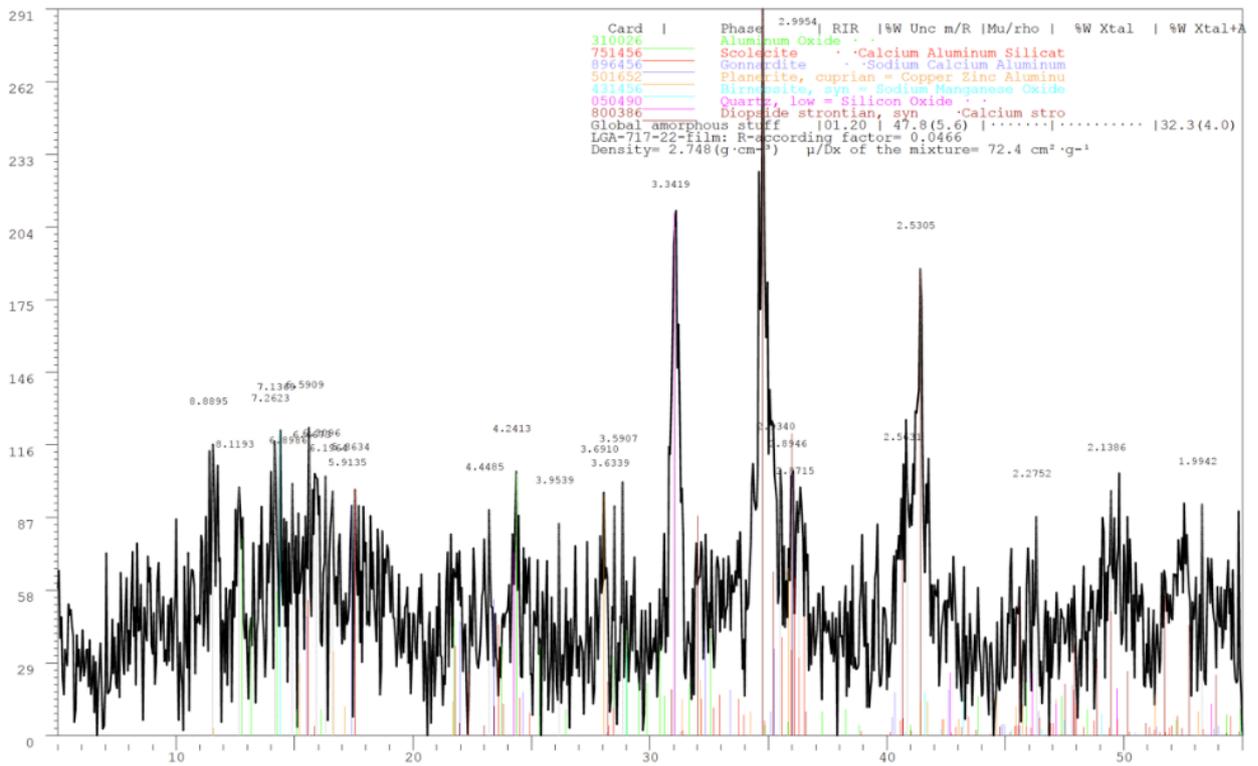


FIG. 46 DIFRACTOGRAMA DE MUESTRA DE ESCORIAS DE MATEHUALA.

Sample: LGA-710-22-film Lambda= 1.78897

Date: 22/02/2023 · XPowder Ver. 2010.01.35 · e\_mail: support@xpowder.com http://www.xpowder.com · License to \inXitu Inc:Inner Use

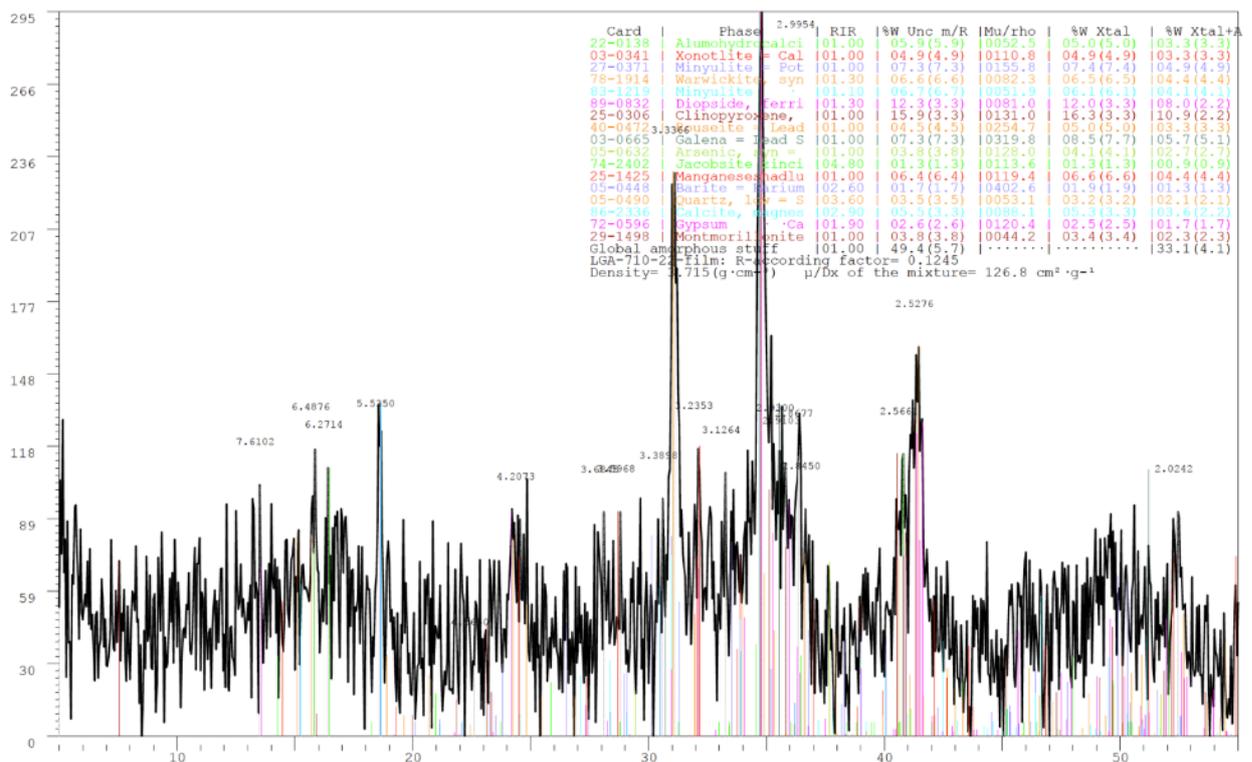


FIG. 47 DIFRACTOGRAMA 2 DE MUESTRAS DE ESCORIAS DE MATEHUALA.

Sin embargo, debido a la falta de información, se empleó otra técnica para comprender la relación de los minerales detectados con la matriz vítrea y, por otro lado, determinar si existen fases minerales no identificadas por esta técnica que puedan estar presentes y contengan los elementos con potencial de valorización.

TABLA 26 FASES MINERALES DETECTADAS POR DRX EN ESCORIAS DE MATEHUALA.

Mineral	Fórmula
Amorfo	>30%
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>
Birnesita	(Na,Ca) <sub>0.5</sub> (Mn <sup>4+</sup> ,Mn <sup>3+</sup> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub> · 1.5H <sub>2</sub> O
Diópsido	MgCaSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>
Gonnardita	(Na,Ca) <sub>2</sub> (Si,Al) <sub>5</sub> O <sub>10</sub> · 3H <sub>2</sub> O
Scolecita	CaAl <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> · 3H <sub>2</sub> O
Óxido de Al	Al <sub>2</sub> O
Planerita de Cu	Cu <sub>3</sub> Al <sub>4</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH) <sub>9</sub> · 4H <sub>2</sub> O
Clinopiroxeno	(Ca,Mg,Fe,Mn,Na,Li)(Al,Mg,Fe,Mn,CR,Sc,Ti)(Si,Al) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>
Galena	PbS

### Análisis con Microscopio Electrónico de Barrido y EDS

De acuerdo con los resultados obtenidos de análisis con el microscopio electrónico de barrido en las briquetas pulidas, es evidente apreciar la existencia de dos fases principales (FIG. 48):

1. La primera, una matriz vítrea con una composición química muy marcada (Tabla 27), la cual está principalmente conformada por Si (14 a 26 wt. %), Fe (14 a 24 wt. %), Ca (12 a 20 wt. %) y O (30 a 40 wt. %), asumiendo la presencia de silicatos, además, contiene bajas concentraciones (< 3 wt. %) de K, S, Na y Zn. Esta fase es la más abundante y es la que se observa en una escala macro como vidrio negro a marrón oscuro.
2. La segunda fase se presenta como pequeñas inclusiones de precipitados que van de los 150 μm a los 1400 μm aproximadamente, las cuales, muestran composiciones químicas variadas, en donde se observa de manera general una predominancia de los elementos Fe (25 a 61 wt. %), Cu (28 a 45 wt. %), Pb (22 a 49 wt. %) y S (1 a 32 wt. %). Además, muestra

una mayor concentración del Zn (< 20 wt. %), que es uno de los metales con potencial económico; del mismo modo, se presenta la Ag (< 10 wt. %) formando parte de dichas inclusiones. Estos precipitados tienen formas variadas, aun así, predominan las formas circulares regulares y algunos otros con formas irregulares o elongadas; asimismo, sus composiciones van muy de la mano de las diferentes coloraciones y texturas que se tienen dentro de ellos.

Después del análisis realizado, se puede concluir que los elementos de interés se encuentran en pequeñas inclusiones polimetálicas de posibles sulfuros en una matriz vítrea. Las inclusiones mostraron a grandes rasgos tres diferentes tipos de asociaciones (Tabla 28, ANEXO. 23, ANEXO. 24, ANEXO. 25, ANEXO. 25 y ANEXO. 26):

- I. Tipo I en la que predomina el Fe. Las especies presentes van desde sulfuros de Fe (pirrotita), sulfuros de Fe y Cu (las que predominan), sulfuros de Fe y Zn, especies polimetálicas de Fe, Cu y Pb con pequeño contenido de Ag.
- II. Tipo II en el que predomina el Cu. Las especies identificadas son sulfuros de Cu y Fe bornita  $Cu_5Fe^{2+}S_4$ , a las que se les detectó presencia de Ag. Sin embargo, la mayor concentración de Ag se detectó en una especie de sulfuro de Cu, Pb y Fe, la cual fue de wt. 10 %. Por último, se detectó Sb en tetrahedrita  $Cu_9Fe^{2+}_3Sb_4S_{13}$ .
- III. Tipo III En el que predomina el Pb. Las especies identificadas son principalmente sulfuros de Pb, Cu y Fe en las que se detectó la presencia de Ag. También, se identificó una fracción con casi el 50 % de Pb, la cual presenta poco contenido de S, pero mayor de Si.

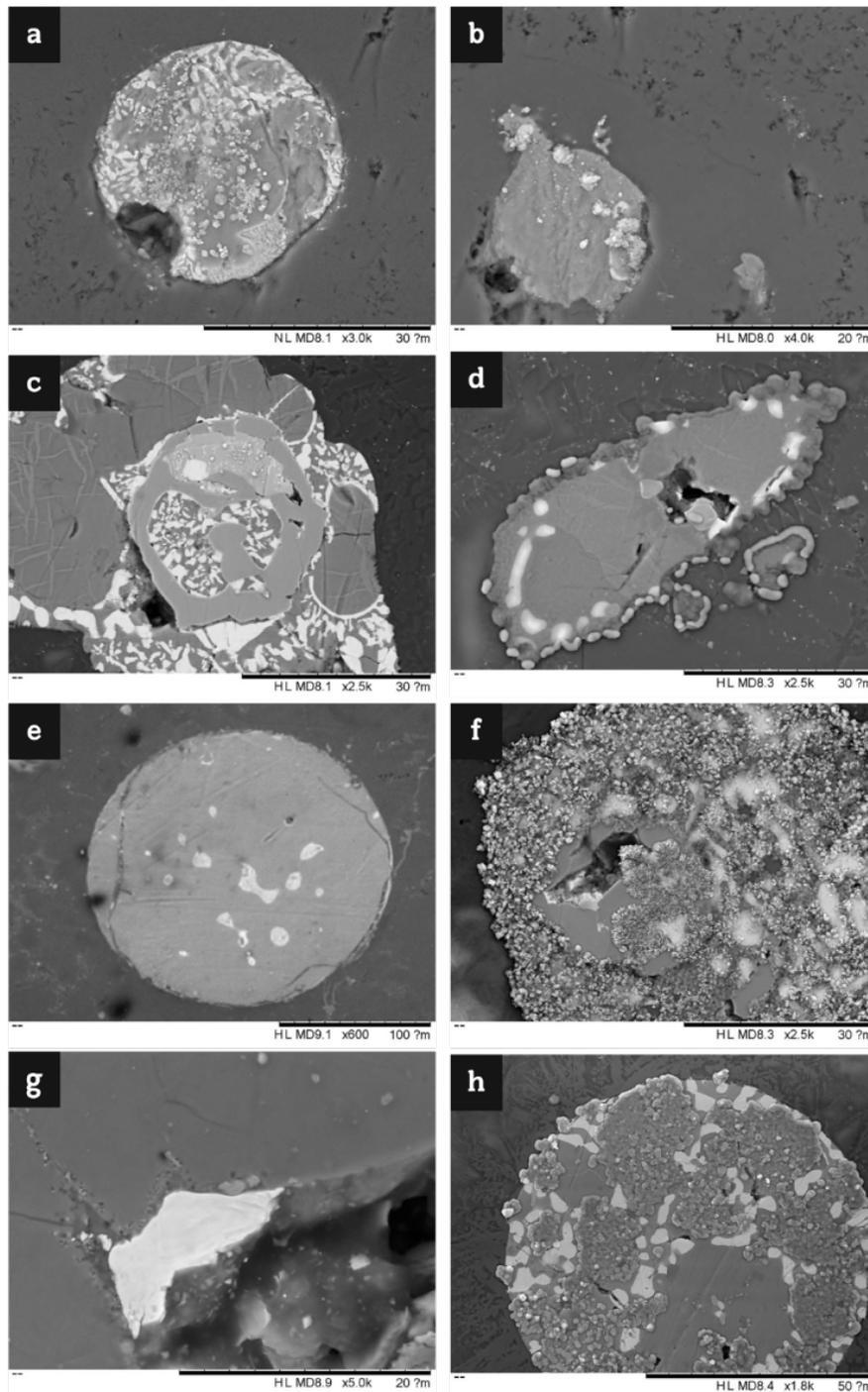


FIG. 48 INCLUSIONES POLIMETÁLICAS EN MATRIZ VÍTREA DE LAS ESCORIAS DE MATEHUALA, SAN LUIS POTOSÍ. OBTENIDO POR ESPECTROSCOPÍA DE ENERGÍA DISPERSIVA (EDS, POR SUS SIGLAS EN INGLÉS) ACOPLADO EN MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO. (A) SULFURO DE PB CON CU, FE Y PRESENCIA DE AG EN FORMA CIRCULAR; (B) SULFURO DE CU Y FE EN INCLUSIÓN CIRCULAR EN MATRIZ DE VIDRIO; (C) INCLUSIÓN IRREGULAR POLIMETÁLICA CON DIFERENTES TEXTURAS: (TEXTURA TIPO MIRMEKITA) ES UN SULFURO DE PB Y CU, (GRIS CLARO EN EL CENTRO, CON PEQUEÑOS PUNTOS BLANCOS) ES UN SULFURO PRINCIPALMENTE DE CU Y SB Y (GRIS OSCURO CON LÍNEAS MÁS CLARAS) ES UN SULFURO DE CU Y FE; (D) SULFURO DE FE Y ZN CON COBRE EN FORMA DE INCLUSIÓN ALARGADA EN MATRIZ VÍTREA; (E) INCLUSIÓN CIRCULAR DE SULFURO DE CU Y FE (CLAROS); (F) INCLUSIÓN POLIMETÁLICA CON TRES FASES IDENTIFICADAS: (MANCHAS CLARAS EN LA INCLUSIÓN) SULFUROS DE CU, PB Y FE CON PRESENCIA DE AG, (ZONA DE PEQUEÑAS PARTÍCULAS COLOR GRIS CLARO) FRACCIÓN POLIMETÁLICA DE CU, S, FE Y AG PRINCIPALMENTE Y (FRACCIÓN LISA GRIS OSCURO) FASE POLIMETÁLICA DE FE CON CU, PB Y AG; (G) PRECIPITADO DE PB Y SI EN MATRIZ DE VIDRIO Y (H) PRECIPITADO POLIMETÁLICO DE DOS FASES: (GRIS CLARO) SULFURO DE FE Y CU Y (GRIS OSCURO) SULFURO DE FE.

TABLA 27 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA FASE VÍTREA DE LAS ESCORIAS, OBTENIDO POR ESPECTROSCOPIA DE ENERGÍA DISPERSIVA (EDS, POR SUS SIGLAS EN INGLÉS) ACOPLADO EN MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO.

Sección	wt. %								
	O	Fe	Ca	Si	Al	K	S	Na	Zn
Vidrio	30.36	25.34	19.36	14.63	2.3				
	38.91	23.21	12.56	18.88	2.95	3.49			
	40.33	19.39	20.38	18.66		1.24			
	40.2	20.91	19.66	15.74	3.48				
	37.99	21.66	15.97	19.84	3.39		1.14		
	38.8	20.26	14.99	20.59	4.1		1.27		
	37.6	18.89	14.21	24.99	2.28			2.03	
	37.14	23.38	15.2	21.83	2.46				
	38.04	25.41	14.51	18.96	2.08			0.99	
	37.18	20.55	10.99	26.19	2.92			2.17	
	37.35	20.23	14.06	22	2.66		0.35		3.34
	42.14	14.47	19.43	20.65	3.32				

Finalmente, los elementos de interés se presentan como sulfuros o fases polimetálicas, incluidos en una matriz que no presenta rasgos importantes de intemperismo, por lo que se podría determinar como un material resistente y competente. La extracción de los metales como el Zn y Cu tiene que ser llevada a cabo como la minería de roca dura, la cual necesita de procesamiento y beneficio para que dichas inclusiones puedan ser separadas del material y pueda haber una recuperación del Cu y del Zn. Por esta razón es necesario analizar los costos implicados en cada uno de los procesos necesarios para que su beneficio sea económicamente factible.

TABLA 28 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS INCLUSIONES POLIMETÁLICAS. OBTENIDO POR ESPECTROSCOPÍA DE ENERGÍA DISPERSIVA (EDS, POR SUS SIGLAS EN INGLÉS) ACOPLADO EN MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO.

		wt. %													
Tipo	Elementos característicos	Fe	Cu	Pb	Zn	S	O	C	Si	Al	Ca	Mg	K	Ag	Sb
I	Fe-S	<b>61.28</b>		0.29		21.41	9.37		4.08	0.43	3.12				
	Fe-Cu-Pb-Ag	<b>47.64</b>	12.31	11.98		1.1	11.88		8.04		6.52			0.52	
	Fe-Zn-S	<b>30.2</b>	4.4		8.25	9.92	22.16		10.79	2.62	9.74		1.93		
	Fe-Cu-S	<b>29.12</b>	15.65			<b>32</b>	13.09		4.45	0.26	5.43				
	Fe-Cu-Zn-S	<b>25.21</b>	12.71		20.5	17.64	16.08		4.37		3.5				
	Fe-Cu-S	<b>24.96</b>	24.92	5.76		19.28	13.41		7.04		4.63				
II	Cu-Fe-S	16.9	<b>45.54</b>			21.78	9.17		3.76		2.85				
	Cu-Fe-S	15.85	<b>45.51</b>			17.43	11.33		5.58		4.29				
	Cu-Fe-S	18.82	<b>43.29</b>			23.81	7.94		3.62		2.56				
	Cu-Fe-S	21.18	<b>41.34</b>			19	10		5.71		2.76				
	Cu-Fe-S-Ag	14.33	<b>40.24</b>		0.18	17.8	12.47		7.53		3.05			4.39	
	Cu-Fe-S-Ag	11.61	<b>39.11</b>	2.91		14.97	11.62	6.84	5.28		5.05			2.62	
	Cu-Fe-S	21.06	<b>38.57</b>			21.73	9.15		6.26		3.23				
	Cu-Pb-S	8.79	<b>32.93</b>	27.86		12.31	7.92		2.9		5.74			1.56	
	Cu-Fe-Pb-S-Ag	9.42	<b>32.49</b>	9.39		16.77	10.2		4.8	0.63	5.94			10.35	
	Cu-Sb-Fe-Mg	15.46	<b>27.91</b>			4.14	5.54	7.14	6.2			11.2			22.4
III	Pb-Si-Fe	7.77		<b>48.89</b>		4.59	16.05		16.3		6.41				
	Pb-Cu-S	8.31	18.71	<b>38.25</b>		8.15	10.73	3.66	5.89		6.3				
	Pb-Cu-Fe-S	13.72	21.41	<b>33.65</b>		14.99	7.83		3.48		4.18	0.74			
	Pb-Cu-Fe-S-Ag	14.47	20.12	<b>23.88</b>		15.96	10.04	3.89	6.43		3.96			1.25	
	Pb-Cu-Fe-S	18.04	21.9	<b>22.19</b>		14.4	11.61		5.92	0.92	5.02				
C-O-Ca-Al		8.83					<b>35.08</b>	<b>18.96</b>	14.64	11.13	11.36				

## Suelos contaminados por polvos de fundición

Gracias a la difracción de rayos X, se identificó que los suelos presentan gran variedad de minerales y materiales amorfos, aunque se presentan en menor proporción que en las escorias se tiene entre 16% y 21% (TABLA 29). Los minerales más abundantes son el cuarzo y la calcita, seguido por sulfatos, arseniatos, sulfuros y arcillas, lo cual concuerda con el tipo de litología que se ha reportado en la zona y la idea de los procesos de oxidación predominantes en un ambiente árido han dado pie a la precipitación de minerales secundarios y al movimiento de los elementos en el suelo.

De acuerdo con los minerales de interés económico detectados (Cu, Zn, Ag y Bi) se identificaron minerales de dos de ellos: para el Cu, Chenevixite (arseniato de Cu y Fe) y para el Zn: Warikahnite (arseniato de Zn), Hydrozincita (carbonato de Zn) y Quetita (Sulfato de Pb y Zn). En contraste, no se encontraron minerales principales de Ag y Bi, por lo tanto, se puede pensar que se encuentran como impurezas en otros elementos o que por procesos de sorción o precipitación puedan formar parte de minerales presentes tal como la calcita, montmorillonita y la queitita (ANEXO. 27, ANEXO. 28, ANEXO. 29 y ANEXO. 30).

TABLA 29 MINERALOGÍA DE LOS SUELOS CONTAMINADOS DE ACUERDO CON LA DRX. EN AZUL OSCURO (>20%), AZUL CLARO (10-20%) Y BLANCO (<10%).

Mineral	Formula
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>
Calcita	CaCO <sub>3</sub>
Montmorillonita	(Na,Ca) <sub>0.33</sub> (Al,Mg) <sub>2</sub> (Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>2</sub> · nH <sub>2</sub> O
Alunógeno	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> · 17H <sub>2</sub> O
Warikahnite	Zn <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O
Chenevixite	Cu <sub>2</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>2</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>4</sub>
Arsenopirita	FeAsS
Troilita	FeS
Polihalita	K <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Mg(SO <sub>4</sub> ) <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O
Yeso	CaSO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O
Beusita	Mn <sup>2+</sup> Mn <sup>2+</sup> <sub>2</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>
Hydrozincite	Zn <sub>5</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>
Queitita	Pb <sub>4</sub> Zn <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> )(SiO <sub>4</sub> )(Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> )
Amorfo	16-21%

De acuerdo con los estudios previamente realizados acerca de la plata, cuando la Ag se encuentra presente en suelos, la especie más abundante es Ag(I) en partículas coloidales de tamaño entre 10-200 nm (Kramer, Adams, Manolopoulos, & Collins, 1999). Gracias a esto, se puede pensar que la plata puede estar sorbida en alguno de los minerales presentes, tal es el caso de una posible sorción en la montmorillonita, siendo esta posibilidad contemplada con anterioridad (VandeVoort & Arai, 2012). Como ya se ha mencionado, el Punto de Carga Zero (PCZ) de la montmorillonita calculada por los autores Ijagbemi et al. (2009) es de  $3.4 \pm 2$ , por lo tanto, en un medio con un pH básico, se pueda favorecer la sorción del catión monovalente de la Ag, o, por otro lado, que la plata se encuentre en nanopartículas.

Analizando el caso del Bi, tampoco se identificaron minerales asociados; sin embargo, se han realizado pocos estudios de su presencia y comportamientos en suelos tanto naturales como en antroposuelos. El Bi(III) se ha identificado formando complejos muy fuertes con material orgánico del suelo (Kleja et al., 2022) lo cual en el caso de los suelos contaminados por la exfundidora no representa un factor que pueda influir en la retención del bismuto. Como resultado, se recomienda el estudio del bismuto y su comportamiento en el suelo, ya que es evidente su presencia tiene que estar relacionada a algunos procesos en lo que este metal móvil (Houet al., 2005) pueda haber sido retenido por alguno de los minerales del suelo tal como las arcillas.

En conclusión, de acuerdo con los resultados obtenidos, las altas concentraciones de Cu, Ag y Bi los hacen atractivos para su reprocesamiento. Sin embargo, se recomienda que para la Ag y el Zn pasen a una etapa de prefactibilidad en la cual se tienen las siguientes consideraciones:

1. El Zn se encuentra relacionado con sulfatos, arseniatos y carbonatos, lo cual posiblemente al estar estables en un medio ácido, se puedan utilizar técnicas ácidas para su recuperación, considerando que las especies mencionadas puedan ser solubles y así liberar al Zn. Al mismo tiempo es necesario poner especial atención a elementos como el As y Pb, ya que han sido estudiados como un potencial peligro para la salud humana y los ecosistemas en la zona de estudios.

2. Asimismo, en el caso de la Ag se considera que pueda estar relacionado con las arcillas, por lo que la búsqueda de técnicas que permitan la separación de las arcillas y una técnica metalúrgica que permita su separación.
3. En cambio, en el caso del Bi, las técnicas usadas y la información recabada no permiten definir si es o no viable su recuperación, por ello, esta investigación, hace hincapié en la necesidad de profundizar en el comportamiento y asociación de este elemento en el suelo.

## 6 CONCLUSIONES

---

### **Modelo de Economía Circular para la minería**

El modelo propuesto logra identificar varios desafíos en la transición de las prácticas de gestión de residuos hacia una economía circular. Entre los más destacados se encuentran los desafíos técnicos, tecnológicos, regulatorios y relacionados con la visión empresarial en el sector minero. Sin embargo, la apremiante necesidad de recursos minerales ha convertido a los residuos en una fuente potencial, especialmente para minerales y elementos críticos. Por lo tanto, reintegrar los materiales descartados en un marco de utilización de recursos cumple con esta premisa, destacando la necesidad de abordar estos desafíos para hacer de esta visión una opción viable para la minería responsable.

El modelo subraya que el punto de partida para decidir si se analiza el residuo desde una perspectiva ambiental o por su potencial de valorización es un muestreo inicial representativo, tanto superficial como en profundidad. Este muestreo es crucial para comprender el potencial, considerando que los residuos no siguen la lógica espacial como lo hacen los depósitos minerales y las interacciones ambientales pueden movilizar elementos. Sin embargo, este factor estará influenciado por el tipo de residuos: ya sean pasivos ambientales o residuos de operaciones activas, que pueden presentarse como un flujo. Esto podría entenderse como un potencial de recuperación para su reintegración en el medio ambiente o como un monitoreo y aprovechamiento constante que reduzca la posibilidad de pérdida de materiales preciosos al buscar su reintegración ambiental.

Conocer el potencial de valorización es el punto más importante de este modelo, en el cual se identificaron los siguientes puntos:

1. La caracterización de residuos es más complicada que en yacimientos vírgenes, esto se debe a que los procesos involucrados en el beneficio y la interacción con la atmósfera alteran el material, resultando en la formación de minerales secundarios y en el alto contenido de minerales poco cristalinos o materiales amorfos.

2. La caracterización mineralógica requiere la combinación de técnicas para comprender las especies presentes, lo que a veces puede resultar costoso. Además de esto, algunos metales considerados como críticos se presentan en concentraciones muy bajas, representando un reto para su caracterización. Sin embargo, se ha identificado la necesidad de desarrollar el conocimiento sobre los subproductos y su relación con los minerales. Esto permitiría realizar estudios centrados en los posibles elementos de interés, dependiendo del contexto geológico del material extraído.
3. Sin embargo, una buena comprensión de la mineralogía puede reducir costos en la toma de decisiones en la selección de métodos metalúrgicos y del mismo modo, mejorar los porcentajes de recuperación.

En la formulación del modelo, se destaca otro aspecto clave: en prácticamente todas las decisiones de valorización, se generan residuos secundarios. Estos residuos pueden ser evaluados con vistas a su estabilización e integración posterior, o bien, a su disposición controlada. Alternativamente, pueden ser evaluados para su aprovechamiento y reutilización con otros fines. Este proceso representa el eslabón final para optimizar al máximo la utilización de los recursos.

En conclusión, se hace necesario implementar un modelo de gestión de residuos para la minería basado en la Economía Circular y dirigido hacia su reintegración al medio ambiente natural. Este modelo debe ser incorporado en la normativa oficial, proporcionando alternativas y métodos que permitan un mayor aprovechamiento de los recursos naturales. Además, es crucial fortalecer y desarrollar el conocimiento sobre los residuos mineros, así como las técnicas para su caracterización cualitativa y el desarrollo de métodos metalúrgicos que faciliten la extracción de metales en baja concentración o en partículas finas.

### **Materiales Críticos y Estratégicos para México**

Después de revisar los factores internos y externos económicos, así como el potencial de producción de minerales y la posición del país en sus relaciones comerciales y políticas, se llegó a la conclusión de que el término "estratégico" es más adecuado para describir la situación de los recursos minerales del país.

En el aspecto interno se muestra la relevancia que se tiene el implementar criterios que aseguren no solo el consumo local y actividades que representan importantes fuentes de capital para el país, tales como actividades de manufactura, producción de alimentos, producción de metales y sus manufacturas, entre otros. Finalmente, la definición de un listado de materiales estratégicos depende directamente del Estado, ya que la administración de los recursos naturales y de su abordaje. Por otro lado, en el aspecto externo, debido a que los tratados comerciales de México han llevado a tener un vínculo fuerte y recíproco con los países de norte américa. Como consecuencia se determinó la necesidad de utilizar los listados de minerales críticos desarrollados por ambos países como base para la propuesta de una para México.

Se crearon 3 diferentes clasificaciones en un listado de materiales los cuales son: materiales de estrategia interna: fosfato y potasa (se busca el desarrollo de producción de abonos y fertilizantes que permita asegurar el suministro en dicha importante actividad del país); materiales de estrategia externa: arsénico, cadmio, grafito, litio y plata y materiales de estrategia interna y externa: antimonio, barita, cobre, fluorita, magnesio, manganeso, molibdeno, titanio, tungsteno, uranio y zinc.

Con el análisis realizado se detectaron algunos puntos que llevan a realizar las siguientes recomendaciones:

1. El tema de minerales críticos es complejo y vital para la estrategia económica de un país; a pesar de que México no se encuentra en una posición para llamar a los materiales que produce o consume como críticos es necesario que se establezca un grupo de expertos que en conjunto revise cada uno de los materiales que se producen o se necesitan en las actividades industriales de nuestro país. El comité que se propone es en conjunto entre: representantes de la academia con conocimientos de los yacimientos minerales y el potencial minero del país, El Servicio Geológico Mexicano, La Cámara Minera de México, Secretaría de Economía y representantes de las diferentes industrias involucradas en el desarrollo económico el país.

2. El entendimiento de los yacimientos minerales en México tiene que ser prioridad de la academia y el Servicio Geológico Mexicano, para no solo conocer los productos primarios que se obtienen, sino desarrollar el conocimiento de los subproductos en las diferentes asociaciones minerales que se tienen en los yacimientos el país. Impulsar a la minería como una industria que aproveche al máximo los recursos minerales es esencial para detectar aquellas oportunidades que hay para la producción de materiales, tal como el uso de los residuos como fuente de ellos. En la educación de las geociencias en el país, es necesario incorporar a los planes de estudio minerales “no convencionales” (tales como de tierras raras) y de minerales no metálicos ya que nuestro país explora principalmente por metales preciosos o aquellos industriales convencionales.
3. Se recomienda hacer una revisión de la Ley Minera y la normatividad en materia, para contar con un marco regulatorio que incentive nuevos proyectos mineros proporcionando confianza para los inversionistas y el fomento industrial e investigación por el Estado. También, es necesario que se revise el término de minerales estratégicos (como el Li) ya que un tema de nacionalización tiene que ir de la mano de una estrategia sólida que se desarrolle desde la educación, la academia y crear el piso en donde existan órganos gubernamentales que se encarguen del desarrollo de conocimiento y de la creación de políticas públicas que controlen las actividades.
4. Finalmente, se propone comenzar a desarrollar un proyecto para cuantificar y localizar los residuos de actividades minero-metalúrgicas históricas, e identificar su potencial para proveer materiales considerados como estratégicos. Tal como la iniciativa del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) Earth Mapping Resources Initiative que busca localizar las posibles fuentes de minerales críticos que aún no han sido descubiertos (US Geological Survey, 2019). Esta propuesta abre el camino para promover un manejo de residuos basado en un modelo de Economía Circular hacia una minería más responsable.

## **Potencial de Valorización para residuos históricos de México**

Con el objetivo de analizar los residuos de dos sitios con actividades minero-metalúrgicas en México, para identificar los materiales críticos que puedan ser obtenidos de dichos materiales en un contexto de modelo de Economía Circular para el manejo de residuos, se analizó el potencial de valorización de cada uno de ellos y se realizó una propuesta para continuar en el camino hacia una Economía Circular propuesta.

### Jales históricos de Cananea, Sonora

De acuerdo con su geoquímica, presentan importante enriquecimiento con respecto a las concentraciones en la corteza continental superior los elementos: Cu, Zn, As, Mo, Ag, In, Sn, Sb, W, Pb, Bi, Au, Cd, S, Re y Se. Sin embargo, al compararlos con leyes de corte de diversos proyectos mineros, las concentraciones promedio del Cu (2817 ppm), Ga (24.62) y Re (0.2) son las únicas que se encuentran cercanas o por encima de éstas. Poniendo a dichos elementos en potenciales para realizar una valorización para la recuperación de los metales del residuo.

Las especies minerales que contengan dichos elementos son difíciles de determinar por las siguientes razones: en el caso del Cu, la presencia de minerales secundarios poco cristalinos y en el caso del Ga y el Re, la baja concentración y su presencia como subproducto en los minerales.

La mineralogía general, resultado de los análisis de la DRX indican la presencia de silicatos, arcillas, hidróxidos de Fe, sulfatos y minerales formadores de roca. Los más abundantes son: cuarzo, caolinita, yeso, clinocloro y sanidina. No obstante, fueron los mapeos elementales con la microsonda electrónica, los que llevaron a una visión más clara de las especies minerales.

El análisis del Ga en las fracciones muestra su dispersión sin asociaciones espaciales definidas con otros elementos. La falta de identificación mineralógica específica lleva a considerar los procesos de concentración posibles, como la sorción en sólidos como arcillas y oxi-hidróxidos de Fe. Se sugiere que la montmorillonita y la caolinita podrían retener el Ga, especialmente en condiciones ácidas, mientras que los oxi-hidróxidos

de Fe también podrían actuar como sorbentes. Se destaca la importancia de estudiar en detalle estas características para entender la asociación del Ga y su posible recuperación. Se propone comenzar estudios metalúrgicos para evaluar la viabilidad de recuperación del Ga de los jales estudiados.

En cuanto al Re, aunque comúnmente se asocia con la molibdenita, el análisis de su dispersión en las fracciones no revela una clara asociación mineralógica con el molibdeno. Sin embargo, se observa una alta correlación espacial entre el renio y el zinc, especialmente en la esfalerita, lo que sugiere una asociación significativa en ciertos sulfuros. La presencia posible de otros sulfuros como la pirita y la calcopirita, junto con la baja concentración de renio en estos minerales, podría dificultar su identificación. Los coeficientes de correlación más altos con el azufre, molibdeno y hierro indican una posible asociación del Re con sulfuros no identificados. Se recomienda realizar una separación de los sulfuros presentes en el residuo para profundizar en la comprensión de esta asociación y explorar técnicas específicas de recuperación de renio, lo que podría ofrecer una mayor claridad sobre su presencia y distribución, permitiendo una estrategia más efectiva para su recuperación.

En cuanto al Cu, los mapeos elementales muestran una complejidad mineralógica en los jales, con presencia de sulfuros de cobre, sulfatos y posibles óxidos. Esta diversidad puede explicar las variaciones en las tasas de recuperación observadas, lo que respalda la necesidad de ajustar las estrategias de recuperación para abordar esta heterogeneidad. La presencia de sulfatos solubles en agua sugiere oportunidades para un procesamiento rentable. Se recomienda un enfoque detallado en la identificación y separación de las especies minerales presentes, posiblemente utilizando técnicas como la flotación o la separación por densidad. Esta investigación proporciona una base importante para optimizar los métodos de recuperación de cobre en los jales, considerando la diversidad mineralógica como un factor clave en el diseño de estrategias eficaces.

#### Escorias producto de la exfundición de Matehuala, San Luis Potosí

La geoquímica de las escorias muestra un enriquecimiento con respecto a las concentraciones de los elementos en la corteza continental superior de los siguientes

elementos: Cu, Zn, As, Ag, Sn, Sb, W, Pb, Bi, Cd. Sin embargo, al comparar los valores con leyes de corte en diversas minas, estos elementos enriquecidos se reducen al Cu (2354 ppm) y el Zn (28040 ppm) con concentraciones por encima de los valores considerados, haciéndolos atractivos para su valorización.

En resumen, la DRX de las escorias mostró complicaciones para la determinación de especies minerales debido al alto nivel de materiales amorfos, resultado de su naturaleza vítrea. Aunque predominan dichos materiales, se identificó la presencia de planerita (fosfato de Cu) y minerales silicatos como dióxido y clinopiroxeno, con baja concentración de otras especies. El análisis con microscopio electrónico reveló inclusiones polimetálicas en una matriz vítrea, destacando tres tipos de asociaciones dominadas por Fe, Cu o Pb. Los elementos con potencial de ser valorizados (Cu y Zn) se presentan como sulfuros o fases polimetálicas en una matriz resistente; su extracción requerirá un enfoque similar a la minería de roca dura, con procesamiento y beneficio. Dado a esto, recomienda un análisis detallado de los costos para evaluar la viabilidad económica de este proceso.

#### Suelos contaminados por polvos de fundición de Matehuala, San Luis Potosí

También en los suelos se presenta el mismo enriquecimiento de los elementos Cu, Zn, As, Ag, Sn, Sb, W, Pb, Bi, Cd. Sin embargo, en este caso, los elementos que tuvieron concentraciones por encima de las leyes de corte analizadas fueron: Cu (6438.17 ppm), Ag (209.92 ppm) y Bi (281.33 ppm).

El análisis de DRX reveló una composición mineral variada en los suelos, donde se destacan minerales como cuarzo, calcita, sulfatos, arseniatos, sulfuros y arcillas. Se identificaron minerales de interés económico como chenevixita para el cobre, warikahnita, hydrozincita y quetita para el zinc. Además, se sugiere la presencia de plata y bismuto como impurezas en otros minerales como calcita, montmorillonita y quetita. En relación con la plata, se plantea la posibilidad de su adsorción en la montmorillonita debido a su punto de carga cero en un medio básico, mientras que para el bismuto se destaca la necesidad de estudios adicionales para comprender su comportamiento en el suelo.

En conclusión, las altas concentraciones de Cu, Ag y Bi sugieren su viabilidad para el reprocesamiento. Se recomienda realizar estudios de prefactibilidad para el Zn, considerando su relación con sulfatos y arseniatos, y para la Ag, explorando técnicas de separación de arcillas. En el caso del Bi, se subraya la necesidad de investigaciones más detalladas sobre su comportamiento en el suelo antes de determinar su viabilidad de recuperación.

En ambos sitios de estudio se enfrentan problemáticas ambientales y se requiere remediar y reintegrar al ambiente. Sin embargo, la evaluación de su potencial de valorización dentro del modelo propuesto destaca materiales estratégicos para México, como el cobre, zinc y plata, y elementos considerados críticos por otros países, como el galio, renio y bismuto. Las recomendaciones proporcionadas pueden ser útiles para una etapa de prefactibilidad hacia un manejo de residuos basado en la Economía Circular. Sin embargo, existe la posibilidad de que el reprocesamiento no sea factible, lo que abre oportunidades para estudiar los residuos de ambos sitios y reutilizarlos para maximizar su uso en el camino hacia una remediación y reintegración al ambiente.

Como se puede ver, la Economía Circular, los materiales estratégicos/críticos y el conocimiento científico en el entendimiento de los residuos mineros, parecen ser de diferente naturaleza, sin embargo, las demandas actuales y retos hacia la reducción del impacto generado por las actividades antropogénicas y la fuerte necesidad de minerales para cumplir los Objetivos del Desarrollo Sostenible, exigen el planteamiento y gestación de proyectos transdisciplinarios que conjunten las ideas y busquen abordar los problemas actuales. Este proyecto es un llamado para los diferentes sectores (industria, academia y gobierno) para trabajar en conjunto en mejorar el entendimiento de estos temas y llegar a conclusiones por el bien de un país rico en recursos, tal como lo es México.

## REFERENCIAS

---

1. Adams, M. D. (2005). *Advances in Gold Ore Processing*. Elsevier.
2. Ahmari, S., & Zhang, L. (2012). Production of eco-friendly bricks from copper mine tailings through geopolymerization. *Construction and Building Materials*, 323-331.
3. Alcalde, J., Kelm, U., & Vergara, D. (2018). Historical assessment of metal recovery potential from old mine tailings: A T study case for porphyry copper tailings, Chile. *Minerals Engineering* 127, 334-338.
4. Alcántara, V. (2022, noviembre 9). México podría proveer a Estados Unidos de minerales críticos. Retrieved from Manufactura LATAM: <https://www.manufactura-latam.com/es/noticias/mexico-podria-proveer-estados-unidos-de-minerales-criticos-o>
5. Álvarez-Ayuso, E., & Murciago, A. (2021, february 10). Stabilization methods for the treatment of weathered arsenopyrite mine wastes: Arsenic immobilization under selective leaching conditions. *Journal of Cleaner Production*, 283.
6. Alvirde Meléndez, A. L. (2024). Propuesta de revalorización y posible recuperación de elementos estratégicos y potencialmente valiosos en residuos mineros y sedimentos del arroyo El barrilito en el Río San Pedro en Cananea, Sonora. (Tesis de licenciatura en proceso). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
7. Amar, H., Benzaazoua, M., Elghali, A., Bussière, B., & Duclos, M. (2020). Upstream environmental desulphurisation and valorisation of waste rocks as a sustainable AMD management approach. *Journal of Geochemical Exploration*, 215.
8. AMC Mining Consultants. (2019). *Technical Report Pegmont Mineral Resource Update and PEA Vendetta Mining Corp.* Vancouver: AMC Mining Consultants (Canada) Ltd.
9. Anawar, H. M. (2015). Sustainable rehabilitation of mining waste and acid mine drainage using geochemistry, mine type, mineralogy, texture, ore extraction and climate knowledge. *Journal of Environmental Management*, 158, 111-121.
10. Anderson, T. H., & Silver, L. T. (1977). U-Pb Isotope Ages of Granitic Plutons Near Cananea, Sonora. *Economic Geology*, 72, 827-836.
11. Araya, N., Kraslawski, A., & Cisternas, L. A. (2020, April 9). Towards mine tailings valorization: Recovery of critical materials from Chilean mine tailings. *Journal of cleaner production*, 263.
12. ArcelorMittal. (2022). *Annual Report 2022*. ArcelorMittal.
13. Ausenco Services Pty Ltd. (2018). *TECHNICAL REPORT ON THE FEASIBILITY STUDY FOR THE SONORA LITHIUM PROJECT, MEXICO*. South Brisbane: Bacanora Minerals Ltd.
14. Ayres, R. U. (1997, July 27). Metals recycling: economic and environmental implications. *Resources, Conservation and Recycling*, 21, 145-173.
15. Azcue, J. M. (1999). *Environmental Impacts of Mining Activities*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
16. Bae, H., & Kim, Y. (2021). Technologies of lithium recycling from waste lithium ion batteries: a review. *Materials Advances*, 2, pp. 3234-3250.
17. Bakken, A. K., Gautneb, H., Sveistrup, T., & Myhr, K. (1998, January 13). Crushed rocks and mine tailings applied as K fertilizers on grassland. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 56, 53-57.
18. Barbosa, B., & Fernando, A. L. (2018). Chapter 9 - Aided Phytostabilization of Mine Waste. In M. N. Prasad, P. J. de Campos Favas, & S. K. Maiti, *Bio-Geotechnologies for Mine Site Rehabilitation* (pp. 147-157). Elsevier.

19. Banco de México. (2023). Banxico. Retrieved from Producto interno bruto - (CR199): <https://www.banxico.org.mx/SieInternet/consultarDirectorioInternetAction.do?sector=2&idCua dro=CR199&accion=consultarCuadro&locale=es>
20. Bian, Z., Miao, X., Lei, S., Chen, S.-e., Wang, W., & Struthers, S. (2012). The Challenges of Reusing Mining and Mineral-Processing Wastes. *Science*, 337.
21. Boger, D. V. (2009). Rheology and the resource industries. *Chemical Engineering Science*, 64(22), 4525-4536.
22. Howell, R. J., Lagos, L., de los Hoyos, C. R., & Declercq, J. (2020, August). Classification and Characteristics of Natural Lithium Resources. *Elements*, 16, 259-264.
23. Boyle, R. W. (1987). *Gold, History and Genesis of Deposits*. New York: Van Nostrand Reinhold.
24. Bushnell, S. E. (1988). Mineralization at Cananea, Sonora, Mexico, and the Paragenesis and Zoning of Breccia Pipes in Quartzofeldspathic Rock. *Economic Geology*, 83, 1760-1781.
25. Cacciuttolo, C., & Atencio, E. (2023, April 11). In-Pit Disposal of Mine Tailings for a Sustainable Mine Closure: A Responsible Alternative to Develop Long-Term Green Mining Solutions. *Sustainability*, 15(8).
26. Calmus, T., Valencia-Moreno, M., Río-Salas, R., Ochoa-Landín, L., & Mendivil-Quijada, H. (2018). A multi-elemental study to establish the natural. Background and geochemical anomalies in rocks from the Sonora river upper basin. *Revista mexicana de Ciencias Geológicas*, 35, 158-167.
27. CAMIMEX. (2023). CAMIMEX. Retrieved from SITUACIÓN DE LA MINERÍA EN MÉXICO 2022: SITUACIÓN DE LA MINERÍA EN MÉXICO 2022
28. Castillo, R., & Purdy, C. (2022, August 1). China's Role in Supplying Critical Minerals for the Global Energy Transition, What Could the Future Hold? Retrieved from Brookings: <https://www.brookings.edu/research/chinas-role-in-supplying-critical-minerals-for-the-global-energy-transition-what-could-the-future-hold/>
29. Castro-Larragoitia, J., Kramar, U., & Puchelt, H. (1997). 200 years of mining activities at La Paz/San Luis Potosi/Mexico - Consequences for environment and geochemical exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 58, 81-91.
30. Cenicerros-Gómez, A. E., Macías-Macías, K. Y., de la Cruz-Moreno, J. E., Gutiérrez-Ruiz, M. E., & Martínez-Jardines, L. G. (2018). Characterization of mining tailings in México for the possible recovery of T strategic elements. *Journal of South American Earth Sciences* 88, 72-79.
31. Cerdá Tena, E., & Khalilova, A. (2016). Economía Circular. *Economía Industrial*, 401, 11-20.
32. Chapa-Vargas, L., Mejía-Saavedra, J. J., Monzalvo-Santos, K., & Puebla-Olivares, F. (2010). Blood lead concentrations in wild birds from a polluted mining region at Villa de La Paz, San Luis Potosí, Mexico. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 45:1, 90-98.
33. Cho, R. (2022, April 22). News from the Columbia Climate School. Retrieved October 2023, from What Is Decarbonization, and How Do We Make It Happen?: <https://news.climate.columbia.edu/2022/04/22/what-is-decarbonization-and-how-do-we-make-it-happen/>
34. Congreso de la Ciudad de México. (2023, 28 de febrero). Ley de Economía Circular de la Ciudad de México. *Gaceta Oficial de la Ciudad de México*.
35. Deady, E., Moon, C., Moore, K., Goodenough, K. M., & Shail, R. K. (2022). Bismuth: Economic geology and value chains. *Ore Geology Reviews*, 143.

36. Djellali, A., Laouar, M. S., Saghafi, B., & Houam, A. (2019, January 08). Evaluation of Cement-Stabilized Mine Tailings as Pavement Foundation Materials. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37, 2811-2822.
37. Del Rio-Salas, R., Ochoa-Landín, L., Valencia-Moreno, M., Calmus, T., Meza-Figueroa, D., Salgado-Souto, S., . . . Mendivil-Quijada, H. (2015). New U-Pb and Re-Os geochronology of Laramide porphyry copper mineralization along the Cananea lineament, northeastern Sonora, Mexico: Contribution to the understanding of the Cananea copper district. *Ore Geology Reviews*.
38. Department of Commerce USA. (2023, November 05). Mexico - Country Commercial Guide. Retrieved from International Trade Administration: <https://www.trade.gov/country-commercial-guides/mexico-mining-and-minerals>
39. Department of Industry, Science and Resources. (2023, September 30). CRITICAL MINERALS STRATEGY 2023–2030. Retrieved from Australian Government: <https://www.industry.gov.au/publications/critical-minerals-strategy-2023-2030/strategy-glance>
40. Dino, G. A., Mehta, N., Rossetti, P., Ajmone-Marsan, F., & De Luca, D. A. (2018). Sustainable approach towards extractive waste management: Two case studies from Italy. *Resources Policy*.
41. Dino, G. A., Rossetti, P., Perotti, L., Alberto, W., Sarkka, H., Coulon, F., . . . Rodeghiero, F. (2018). Landfill mining from extractive waste facilities: The importance of a correct site characterisation and evaluation of the potentialities. A case study from Italy. *Resources Policy*, 0301-4207.
42. Diputados, S. d. (2021, 17 de noviembre). Proyecto de decreto de expedición de la Ley de Economía Circular. Retrieved from [https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/senclave/65/CS-LXV-I-1P-038/01\\_minuta\\_038\\_17nov21.pdf](https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/senclave/65/CS-LXV-I-1P-038/01_minuta_038_17nov21.pdf)
43. Dirección General de Desarrollo Minero. (2018, Diciembre). Perfil de mercado del litio. Retrieved from Gobierno de México: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/419275/Perfil\\_Litio\\_2018\\_\\_T\\_.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/419275/Perfil_Litio_2018__T_.pdf)
44. Dold, B., & Fontboté, 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(1-3), 3-55.
45. Eggert, R. G. (2011, september). Minerals go critical. *Nature Chemistry*, 3.
46. Erdmann, L., & Graedel, T. E. (2011). Criticality of Non-Fuel Minerals: A Review of Major Approaches and Analyses. *Environmental Science & Technology*, 45, 7620-7630.
47. Espinosa-Reyes, G., González-Mille, D. J., Ilizaliturri-Hernández, C. A., Mejía-Saavedra, J., Cilia-López, V. G., Costilla-Salazar, R., & Díaz-Barriga, F. (2014). Effect of Mining Activities in Biotic Communities of Villa de la Paz, San Luis Potosi, Mexico. *BioMed Research International*, 13.
48. Esposito, M., Tse, T., & Soufani, K. (2015). Is the Circular Economy a New Fast-Expanding Market? Wiley Online Library.
49. European Commission. (2020). Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020) Final Report. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
50. European Commission. (2023, March 16). Europa. Retrieved from European Critical Raw Materials Act : [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_23\\_1661](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_1661)
51. European Commission. (2023, September 27). Critical raw materials. Retrieved from Single market economy: [https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en)

52. Falagán, C., Grail, B. M., & Johnson, D. B. (2017). New approaches for extracting and recovering metals from mine tailings. *Minerals Engineering* 106, 71-78.
53. Faure, G. (1998). *Principles and Applications of Geochemistry: A Comprehensive Textbook for Geology Students (Vol. Second Edition)*. New Jersey, United States of America: Prentice-Hall, Inc.
54. Foley, N. K., Jaskula, B. W., Kimball, B. E., & Schulte, R. F. (2017). Gallium. In U. G. Survey, *Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply* (pp. H1-H35). Reston.
55. Gaboriaud, F., & Ehrhardt, J.-J. (2003). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(5), 967-983.
56. García Gutiérrez, C. (1967). *Geología y Paragénesis del Distrito Minero de Matehuala, San Luis Potosí, México*. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 30(1), 29-62.
57. Gedam, V. V., Raut, R. D., Lopes de Sousa Jabbour, A. B., & Agrawal, N. (2021). Moving the circular economy forward in the mining industry: Challenges to closed-loop in an emerging economy. *Resources Policy*, 74.
58. Gemell, J. B., Zantop, H., & Meinert, L. D. (1992). Genesis of the Aguilar zinc-lead-silver deposit, Argentina; contact metasomatic vs. sedimentary exhalative. *Economic Geology*, 2085-2112.
59. Geoscience Australia. (2023, June 7). Rare Earth Elements. Retrieved from Australian Government, Geoscience Canada: <https://www.ga.gov.au/scientific-topics/minerals/mineral-resources-and-advice/australian-resource-reviews/rare-earth-elements>
60. Giurco, D., Littleboy, A., Boyle, T., Fyfe, J., & White, S. (2014). Circular Economy: Questions for Responsible Minerals, Additive Manufacturing and Recycling of Metals. *Resources*, 3, 432-453.
61. Golder Associates USA Inc. (2022). SEC S-K 1300 Technical Report Summary, Southern Copper Corporation: Buenavista Copper. Arizona, USA: Southern Copper Corporation.
62. Gómez Álvarez, A., Meza Figueroa, D., Villalba Atondo, A. I., Valenzuela García, J. L., Ramírez Hernández, J., & Almendariz Tapia, J. (2009). Estimation of potential pollution from mine tailings in the San Pedro River (1993–2005), Mexico–US border. *Environmental Geology*, 57, 1469–1479.
63. Gómez Álvarez, A., Valenzuela García, J. L., Aguayo Salinas, S., Meza Figueroa, D. M., Ramírez Hernández, J., & Ochoa Ortega, G. (2007). Chemical Partitioning of Sediment Contamination by Heavy Metals in the San Pedro River, Sonora, México. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 19(1).
64. Gómez Álvarez, A., Valenzuela García, J. L., Meza Figueroa, D., de la O Villanueva, M., Ramírez Hernández, J., Almendariz Tapia, J., & Pérez Segura, E. (2011). Impact of mining activities on sediments in a semi-arid environment: San Pedro River, Sonora, Mexico. *Applied Geochemistry*, 26, 2101-2112.
65. Gómez Álvarez, A., Villalba Atondo, A., Acosta Ruíz, G., Castañeda Olivares, M., & Kamp, D. (2004). METALES PESADOS EN EL AGUA SUPERFICIAL DEL RÍO SAN PEDRO DURANTE LOS AÑOS 1997 Y 1999. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 20 (1), 5-12.
66. Government of Canada. (2022). The Canadian Critical Minerals Strategy. Retrieved from canada: <https://www.canada.ca/content/dam/nrcan-rncan/site/critical-minerals/Critical-minerals-strategyDecog.pdf>
67. Grew, A. S. (2020, August). The Minerals of Lithium. *Elements*, 16, 235-240.

68. Gunnesch, K. A., Torres del Angel, C., Cuba Castro, C., & Saez, J. (1994, November 01). The Cu-(Au) skarn and Ag-Pb-Zn vein deposits of La Paz, northeastern Mexico; mineralogical, paragenetic, and fluid inclusion characteristics. *Economic Geology*, 89(7), 1640-1650.
69. Hayes, S. M., & McCullough, E. A. (2018). Critical minerals: A review of elemental trends in comprehensive criticality studies. *Resources Policy*, 192-199.
70. He, X., Kaur, S., & Kosteki, R. (2020, July 15). Mining Lithium from Seawater. *Joule*, 4, pp. 1357-1368.
71. Hellman, P., & Duncan, R. (2018). Evaluating Rare Earth Element Deposits. ASEG Extended Abstracts .
72. Hernández Bárcenas, L. (2017). Caracterización mineralógica de suelos impactados por residuos minero-metalúrgicos en una fundición abandonada en Matehuala, San Luis Potosí [Tesis de Maestría, Instituto Potosino de investigación Científica y Tecnológica]. Repositorio IPICYT.
73. Hernández, L. (2020, Febrero 18). México cuenta con el yacimiento más grande de litio. *El Economista*.
74. Hofstra, A. H., & Cline, J. S. (2000). Characteristics and Models for Carlin-Type Gold Deposits. In S. G. Hagemann, & P. E. Brown, *Gold in 2000*. Society of Economic Geologists.
75. Holtstam, D., Andersson, U. B., Broman, C., & Mansfeld, J. (2014, September 04). Origin of REE mineralization in the Bastnäs-type Fe-REE-(Cu-Mo-Bi-Au) deposits, Bergslagen, Sweden. *Mineralium Deposita*, 49, 933-966.
76. Hou, H., Takamatsu, T., Koshikawa, M., & Hosomi, M. (2005). MIGRATION OF SILVER, INDIUM, TIN, ANTIMONY, AND BISMUTH AND VARIATIONS IN THEIR CHEMICAL FRACTIONS ON ADDITION TO UNCONTAMINATED SOILS. *Soil Science*, 170(8), 624-639.
77. Ijagbemi, C. O., Baek, M.-H., & Kim, D.-S. (2009). Montmorillonite surface properties and sorption characteristics for heavy metal removal from aqueous solutions. *Journal of Hazardous Materials*, 166, 538-546.
78. INEGI. (2010). Retrieved from INEGI, Datos Geográficos: [https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/24/24020.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/24/24020.pdf)
79. INEGI. (2018). Sistema de Cuentas Nacionales de México. Fuentes y metodologías. Año base 2013. Retrieved marzo, 2024 from Instituto Nacional de Estadística y Geografía: [https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_estruc/702825097165.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825097165.pdf)
80. INEGI. (2023, Noviembre 17). Estadística de la Industria Minerometalúrgica. Retrieved from Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <https://www.inegi.org.mx/rnm/index.php/catalog/849/data-dictionary>
81. ININ. (2023, marzo 24). Breve retrospectiva del Uranio en México. Retrieved marzo, 2024 from Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares: <https://www.gob.mx/inin/articulos/breve-retrospectiva-del-uranio-en-mexico>
82. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). Retrieved enero 2023, from INEGI: [https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/26/26019.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/26/26019.pdf)
83. International Energy Agency. (2021, May). Mineral requirements for clean energy transitions. Retrieved October 2023, from International Energy Agency Reports: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions/mineral-requirements-for-clean-energy-transitions>
84. Ivashchenko, V. I. (2021). Rare-Metal (In, Bi, Te, Se, Be) Mineralization of Skarn Ores in the Pitkäranta Mining District, Ladoga Karelia, Russia. 11(2).

85. Jamieson, H. E. (2011, December). Geochemistry and Mineralogy of Solid Mine Waste: Essential Knowledge for Predicting Environmental Impact. *Elements*, 7, 381-386.
86. Jamieson, H. E., Walker, S. R., & Parsons, M. B. (2015). Mineralogical characterization of mine waste. *Applied Geochemistry*, 57, 85-105.
87. Kavanagh, L., Keohane, J., Garcia Cabellos, G., Lloyd, A., & Cleary, J. (2018). Global Lithium Sources—Industrial Use and Future in the Electric Vehicle Industry: A Review. *Resources*, 7(3).
88. Kázmierczak, U., Blachowski, J., & Górniak-Zimroz, J. (2019). Multi-Criteria Analysis of Potential Applications of Waste from Rock Minerals Mining. *Applied Sciences*, 9, 441.
89. Kazmierczak, U., Blachowski, J., Górniak-Zimroz, J., & Wirth, H. (2018, August 30). Quantitative and Qualitative Research on the Waste from the Mining of Rock Raw Materials in Lower Silesia. *Minerals*, 8, 375.
90. Kinnunen, P. H.-M., & Kaksonen, A. H. (2019). Towards circular economy in mining: Opportunities and bottlenecks for tailings valorization. *Journal of Cleaner Production* 228, 153-160.
91. Kleja, D. B., Gustafsson, J. P., Kessler, V., & Persson, I. (2022). Bismuth(III) Forms Exceptionally Strong Complexes with Natural Organic Matter. *Environ. Sci. Technol.*, 56(5), 3076-3084.
92. Kraepiel, A. M., Keller, K., & Morel, F. M. (1999). A Model for Metal Adsorption on Montmorillonite. *Journal of Colloid and Interface Science*, 210, 43-45.
93. Kramer, J. R., Adams, N. W., Manolopoulos, H., & Collins, P. V. (1999). Silver at an old mining camp, Cobalt, Ontario, Canada. *Environmental Toxicology and Chemistry*.
94. Kundu, T., Rath, S. S., Das, S. K., Parhi, P. K., & Angadi, S. I. (2023, February 1). Recovery of lithium from spodumene-bearing pegmatites: A comprehensive review on geological reserves, beneficiation, and extraction. *Powder Technology*, 415.
95. Kwak, T. A., & Abeysinghe, P. B. (2018). Rare earth and uranium minerals present as daughter crystals in fluid inclusions, Mary Kathleen U-REE skarn, Queensland, Australia. *Mineralogical Magazine*, 51(363).
96. L ebre,  ., & Corder, G. (2015, August 25). Integrating Industrial Ecology Thinking into the Management of Mining Waste. *Resources*, 4, 765-786.
97. L ebre,  ., Corder, G. D., & Golev, A. (2016, December 6). Sustainable practices in the management of mining waste: A focus on the mineral resource. *Minerals Engineering*.
98. L ebre,  ., Corder, G., & Golev, A. (2017). The Role of the Mining Industry in a Circular Economy A Framework for Resource Management at the Mine Site Level. *Journal of Industrial Ecology*, 21.
99. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. (1988, enero 28). Diario Oficial de la Federación. Mexico, Mexico: Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión.
100. Ley General para la Prevención y gestión Integral de los Residuos. (2021, enero 18). Diario Oficial de la Federación. México, México: Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión.
101. Ley Minera. (1992, junio 26). Diario Oficial de la Federación . Ciudad de México, México: Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión.
102. Little, L., Mclennan, Q., Prinsloo, A., Muchima, K., Kaputula, B., & Siame, C. (2018). Relationship between ore mineralogy and copper recovery across different processing circuits at Kansanshi mine. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 118(11), 1155-1162.

103. Lottermoser, B. G. (2010). *Mine Wastes* (Vol. Third Edition). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin, Heidelberg.
104. Lottermoser, B. G. (2010). *Mine Wastes, Characterization, Treatment and Environmental Impacts* (Vol. Third Edition). Queensland, Australia: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
105. Lottermoser, B. G. (2011, December). Recycling, Reuse and Rehabilitation of Mine Wastes. *Elements*, 7, 405-410.
106. Lowell, J. D., & Guilbert, J. M. (1970). Lateral and Vertical Alteration-Mineralization Zoning in Porphyry Ore Deposits. *Economic geology*, 65(4), pp. 373-408.
107. Lu, H., Qi, C., Chen, Q., Gan, D., Xue, Z., & Hu, Y. (2018, July 1). A new procedure for recycling waste tailings as cemented paste backfill to underground stopes and open pits. *Journal of Cleaner Production*, 188, 601-612.
108. Luong, H. T., & Liu, J. (2014). Flotation separation of gallium from aqueous solution – Effects of chemical speciation and solubility. *Separation and Purification Technology*, 132, 115-119.
109. Manz, M., & Castro, L. J. (1997). THE ENVIRONMENTAL HAZARD CAUSED BY SMELTER SLAGS FROM THE STA. MARIA DE LA PAZ MINING DISTRICT IN MEXICO. *Environmental Pollution*, 98, 7-13.
110. Marek, J. M. (2011). TECHNICAL REPORT, ENDAKO MOLYBDENUM MINE. ThompsonCreek, Metals Company Inc.
111. Martin, G., Rentsch, L., Höck, M., & Bertau, M. (2016). Lithium Market Research – Global Supply, Future Demand and Price Development. *Energy Storage Materials*, 6.
112. Martin, G., Rentsch, L., Höck, M., & Bertau, M. (2017). Lithium market research – global supply, future demand and price development. *Energy Storage Materials*, 6, 171-179.
113. Martínez-Villegas, N., Briones-Gallardo, R., Ramos-Leal, J. A., Avalos-Borja, M., Castañón-Sandoval, A. D., Razo-Flores, E., & Villalobos, M. (2013). Arsenic mobility controlled by solid calcium arsenates: A case study in Mexico showcasing a potentially widespread environmental problem. *Environmental Pollution*, 176, 114-122.
114. Martins, N. P., Srivastava, S., Veiga Simão, F., Niu, H., Perumal, P., Snellings, R., . . . Habert, G. (2021). Exploring the Potential for Utilization of Medium and Highly Sulfidic Mine Tailings in Construction Materials: A Review. *Sustainability*.
115. Megaw, P. K., Ruiz, J., & Titley, S. R. (1988, December 01). High-temperature, carbonate-hosted Ag-Pb-Zn(Cu) deposits of northern Mexico. *Economic Geology*, 83(8), 1856-1885.
116. Meinert, L. D. (1992). Skarns and Skarn Deposits. *Geoscience Canada*, 19(4)(<https://journals.lib.unb.ca/index.php/GC/article/view/3773>).
117. Meinert, L. D., Dipple, G. M., & Nicolescu, S. (2005). World Skarn Deposits. In J. W. Hedenquist, J. F. Thompson, R. J. Goldfarb, & J. P. Richards, *One Hundredth Anniversary Volume*. Society of Economic Geologists.
118. Mejía, J., & Aliakbari, E. (2023). Fraser Institute. Retrieved from SURVEY OF MINING COMPANIES 2022: <https://www.fraserinstitute.org/sites/default/files/annual-survey-of-mining-companies-2022.pdf>
119. Metals, L. X. (2020, March 31). Mineral Resource & Ore Reserve Estimates. Retrieved from Metals X: <https://www.metalsx.com.au/tin-mineral-resource-estimates/>
120. Metals, S. (2020, November 18). Cusi Mine. Retrieved from Sierra Metals: <https://www.sierrametals.com/projects/operations/cusi-mine/default.aspx>

121. Meuser, H. (2010). Anthropogenic Soils. In *Contaminated Urban Soils. Environmental Pollution* (Vol. 18). Dordrecht: Springer.
122. Mining México. (2022, octubre 18). México aumentará su producción de minerales críticos. Retrieved from Mining Mexico: <https://miningmexico.com/mexico-aumentara-su-produccion-de-minerales-criticos/>
123. Misra, K. C. (2000). Skarn Deposits. In K. C. Misra, *Understanding Mineral Deposits* (pp. 414-449). Springer Dordrecht.
124. Mongoljiibuu, S. O. (2022). Evaluation of extraction routes for sulphide concentrates from processing of complex skarn ores located in the Erzgebirge region [Doctoral dissertation, University of Leoben].
125. Moreno Vázquez, J. L. (2019). Retrieved from El Colegio de Sonora: <https://www.colson.edu.mx/coldetalle.aspx?cx=338>
126. Mwandira, W., Nakashima, K., & Kawasaki, S. (2022). Chapter 13 - Stabilization/solidification of mining waste via biocementation. *Low Carbon Stabilization and Solidification of Hazardous Wastes*, 201-209.
127. Nassar, N. T., & Fortier, S. M. (2021). Methodology and Technical Input for the 2021 Review and Revision of the U.S. Critical Minerals List. U.S. Geological Survey.
128. Nassar, N. T., & Fortier, S. M. (2021). Methodology and Technical Input for the 2021 Review and Revision of the U.S. Critical Minerals List. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey.
129. Nassar, N. T., Graedel, T. E., & Harper, E. M. (2015, april 3). By-product metals are technologically essential but have problematic supply. *Industrial Ecology*.
130. Nations, U. (2021). United Nations. Retrieved from Department of Economic and Social Affairs Sustainable Development: <https://sdgs.un.org/goals>
131. Northern Dynasty Minerals. (2020). Northern Dynasty: new Pebble mineral resource estimate increases US strategic Rhenium sources by 84%. Vancouver: Northern Dynasty Minerals.
132. Ochoa Landín, L., Pérez Segura, E., Del Río Salas, R., & Valencia Moreno, M. (2011). Depósitos minerales de Sonora, México. In T. Calmus,, *Panorama de la geología de Sonora, México* (pp. p. 299–331). México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 118.
133. Persson, P., Zivkovi, K., & Sjoberg, S. (2006). Quantitative Adsorption and Local Structures of Gallium(III) at the Water-a-FeOOH Interface. *Langmuir*, 22, 2096-2104.
134. Pinto-Linares, P. J., Levresse, G., Tritlla, J., Valencia, V. A., Torres-Aguilera, J. M., González, M., & Estrada, D. (2008). Transitional adakite-like to calc-alkaline magmas in a continental extensional setting at La Paz Au-Cu skarn deposits, Mesa Central, Mexico: metallogenic implications. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25(1).
135. Pirajno, F. (2010). *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. East Perth, WA, Australia: Geological Survey of Western Australia, Springer Science+Business Media B.V. 2009, 2010.
136. Plumlee, G. S. (1999). THE ENVIRONMENTAL GEOLOGY OF MINERAL DEPOSITS. *Reviews in Economic Geology*, 6, 71-116.
137. Plumlee, G. S., & Morman, S. A. (2011, December). Mine Wastes and Human Health. *Elements*, 7, 399-404.
138. Rampacek, C. (1982). An overview of mining and mineral processing waste as a resource. *Resources and Conservation*, 75-66.

139. Rampacek, C. (1982). An overview of mining and mineral processing waste as a resource. *Resources and Conservation*, Volume 9, 75-86.
140. Razo, I., Carrizales, L., Castro, J., Díaz-Barriga, F., & Monroy, M. (2004). ARSENIC AND HEAVYMETAL POLLUTION OF SOIL, WATER AND SEDIMENTS IN A SEMI-ARID CLIMATE MINING AREA IN MEXICO. *Water, Air, and Soil Pollution*, 152, 129–152.
141. Rodríguez-Hernández, A., Lázaro, I., Razo, I., & Briones-Gallardo, R. (2021). Geochemical and mineralogical characterization of stream sediments impacted by mine wastes containing arsenic, cadmium and lead in North-Central Mexico. *Journal of Geochemical Exploration*, 221.
142. Romero, F. M. (2004). Procesos geoquímicos que controlan la movilidad de metales y metaloides en jales de sulfuros metálicos. "El Fraile", Taxco-Guerrero. (Tesis de Doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México, México D. F.
143. Rudnick, R. L., & Gao, S. (2003). Composition of the continental Crust: Treatise on Geochemistry. Elsevier-Pergamon, 3, 1-64.
144. Santander. (2023, Octubre). Cifras del comercio exterior en México. Retrieved from Santander Trade: [https://santandertrade.com/es/portal/analizar-mercados/mexico/cifras-comercio-exterior#classification\\_by\\_country](https://santandertrade.com/es/portal/analizar-mercados/mexico/cifras-comercio-exterior#classification_by_country)
145. Schulz, K. J., DeYoung, J. H., Seal II, R. R., & Bradley, D. C. (2017). Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply. U.S. Geological Survey Professional Paper 1802.
146. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2020, marzo 24). México y sus exportaciones. Retrieved from Gobierno de México: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/mexico-y-sus-exportaciones#:~:text=M%C3%A9xico%20es%20el%20principal%20pa%C3%ADs,aguacate%20C%20tequila%20entre%20otros>.
147. Secretaría de Economía. (2014, mayo 09). ACUERDO por el que se aprueba el Programa de Desarrollo Minero 2013-2018. Retrieved marzo, 2024 from Diario Oficial de la Federación: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5344070&fecha=09/05/2014&print=true](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5344070&fecha=09/05/2014&print=true)
148. Secretaría de Economía. (2021, Marzo). Cifras sobre comercio México – EE.UU. Retrieved from Gobierno de México: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/627033/Comercio\\_ficha\\_MxEU\\_2.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/627033/Comercio_ficha_MxEU_2.pdf)
149. Secretaría de Economía. (2023, mayo 24). Minería. Retrieved from Gobierno de México: <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/mineria>
150. Secretaría de Economía. (2023, Octubre 06). Comercio Exterior, Países con Tratados y Acuerdos firmados con México. Retrieved from Gobierno de México, Secretaría de Economía: <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/comercio-exterior-paises-con-tratados-y-acuerdos-firmados-con-mexico>
151. Seedorff, E., Dilles, J. H., Proffett, J. M., Einaudi, M. T., Zurcher, L., Stavast, W. J., . . . Barton, M. D. (2005, January 01). Porphyry Deposits: Characteristics and Origin of Hypogene Features. In J. W. Hedenquist, J. F. Thompson, R. J. Goldfarb, & J. P. Richards, One Hundredth Anniversary Volume.
152. SEMARNAT. (2006, 06 23). NORMA Oficial mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005. México: Diario Oficial de la Federación.
153. SEMARNAT. (2011, 08 30). NORMA Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009. México: Diario Oficial de la Federación.

154. SEMARNAT. (2018, Octubre 16). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Retrieved from Gobierno de México: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/la-lgeepa-eje-rector-del-sistema-juridico-ambiental-de-mexico?idiom=es>
155. SEMARNAT. (2023, febrero 03). Plan de manejo de residuos mineros de Buenavista del Cobre. Retrieved marzo, 2024 from Gobierno de México: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/801760/Presentacion\\_del\\_Plan\\_de\\_Manejo\\_Residuos\\_BVC.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/801760/Presentacion_del_Plan_de_Manejo_Residuos_BVC.pdf)
156. Servicio Geológico Mexicano. (2021). Panorama Mlinero del Estado de San Luis Potosí. Panorama Minero de los Estados, 62.
157. Siesgesmund, S., López-Doncel, R., Sieck, P., Wilke, H., Wemmer, K., Frei, D., & Oriolo, S. (2018). Geochronological and geochemical constraints on the genesis of Cu-Au skarn deposits of the Santa María de la Paz district (Sierra del Fraile, Mexico). *Ore Geology Reviews*.
158. Siirola, J. J. (2014). Speculations on global energy demand and supply going forward. *Chemical Engineering*, 5, 96-100.
159. Sillitoe, R. H. (1972, April 1). A Plate Tectonic Model for the Origin of Porphyry Copper Deposits. *Economic Geology*, 67(2), 184–197.
160. Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, 105(1), 3-41.
161. Simonsen, A. T., Solismaa, S., Hansen, H. K., & Jensen, P. E. (2020). Evaluation of mine tailings' potential as supplementary cementitious materials based on chemical, mineralogical and physical characteristics. *Waste Management* 102, 710-721.
162. Singh, R. J., & Bushee, J. (1977). The Rock Cycle. *Journal of Geological Education*, 25:5, 146-147.
163. Sposito, G. (1998). On Points of Zero Charge. *Environ. Sci. Technol.*, 32(19), 2815-2819.
164. Stahel, W. R. (2016, March 24). Circular Economy. *Nature*, 531, 435-438.
165. Stillings, L. L. (2017). Selenium, chap. In K. J. Schulz, J. H. DeYoung, R. R. Seal, & D. C. Bradley, *Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply: U.S. Geological Survey Professional Paper 1802* (pp. Q1-Q55). Reston, VA: U.S. Geological Survey.
166. Strawn, D. G. (2021, February 24). Sorption Mechanisms of Chemicals in Soils. *Soil Systems*.
167. Swain, B. (2017, January 1). Recovery and recycling of lithium: A review. *Separation and Purification Technology*, 172, 388-403.
168. Swanson, A. (2023, May 21). The U.S. Needs Minerals for Electric Cars. Everyone Else Wants Them Too. *The New York Times*.
169. Tabelin, C. B., Dallas, J., Casanova, S., Pelech, T., Bournival, G., Saydam, S., & Canbulat, I. (2021). Towards a low-carbon society: A review of lithium resource availability, challenges and innovations in mining, extraction and recycling, and future perspectives. *Minerals Engineering*, 163.
170. Talens Peiró, L., Villalba Méndez, G., & Ayres, R. U. (2013, July 11). Lithium: Sources, Production, Uses, and Recovery Outlook. *JOM*, 65, 986-996.
171. The World Bank. (2023, October 19). The World Bank. Retrieved from Worldwide Governance Indicators: <https://www.worldbank.org/en/publication/worldwide-governance-indicators>
172. Theodore, T. G., Orris, G. J., Hammarstrom, J. M., & Bliss, J. D. (1930). *Gold-Bearing Skarns*. Washington: U. S. Geological Survey.

173. Titley, S. R. (1981). Porphyry Copper: Circumstantial evidence suggests that porphyry-related deposits, currently the world's principal source of copper, may have formed as by-products of volcanic activity. *American Scientist*, 69(6), 632-638.
174. Tschapek, M., Tcheichvili, L., & Wasowski, C. (2018). The point of zero charge (pzc) of kaolinite and SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mixtures. *Clay Minerals*, 10(4), 219-229.
175. U.S. Geological Survey, Department of the Interior. (2022, february 22). news. Retrieved from USGS: [https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/media/files/2022%20Final%20List%20of%20Critical%20Minerals%20Federal%20Register%20Notice\\_222022-F.pdf](https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/media/files/2022%20Final%20List%20of%20Critical%20Minerals%20Federal%20Register%20Notice_222022-F.pdf)
176. United Nations (UN). (2015, December 12). United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). Retrieved 4 Octubre 2023, from [https://unfccc.int/sites/default/files/english\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf)
177. US Geological Survey. (2019, June 19). Earth Mapping Resources Initiative (Earth MRI). Retrieved from USGS : <https://www.usgs.gov/special-topics/earth-mri>
178. Valaskova, M. (2012). Clay Minerals in Nature - Their Characterization, Modification and Application. InTech.
179. Valencia-Moreno, M., Ochoa-Landín, L., Noguez-Alcántara, B., Ruiz, J., & Pérez-Segura, E. (2006). Características metalogenéticas de los depósitos de tipo pórfido cuprífero en México y su situación en el contexto mundial. *BOLETÍN DE LA SOCIEDAD GEOLÓGICA MEXICANA*, 1-26.
180. Valentine, W. G. (1936, January 31). Geology of the Cananea mountains, Sonora, Mexico. *Bulletin of the Geological Society of America*, 47, 53-86.
181. VandeVoort, A. R., & Arai, Y. (2012). Chapter two - Environmental Chemistry of Silver in Soils: Current and Historic Perspective. *Advances in Agronomy*, 114, 59-90.
182. Wodzicki, W. A. (2001). The Evolution of Magmatism and Mineralization in the Cananea District, Sonora, Mexico. In T. Albinson, & C. E. Nelson, *New Mines and Discoveries in Mexico and Central America* (Vol. 8). Society of Economic Geologists.
183. World Mining Data. (2023). World Mining Data. Retrieved from Data Section: [https://www.world-mining-data.info/?World\\_Mining\\_Data\\_\\_\\_Data\\_Section](https://www.world-mining-data.info/?World_Mining_Data___Data_Section)
184. Xiong, Y., Zhou, T., Fan, Y., Chen, J., Wang, B., Liu, J., & Wang, F. (2022). Enrichment mechanisms and occurrence regularity of critical minerals resources in the Yaojialing Zn skarn polymetallic deposit, Tongling district, eastern China. *Ore Geology Reviews*, 144.
185. Xu, J., Cook, N. J., Ciobanu, C. L., Li, X., Kontonikas-Charos, A., Gilbert, S., & Lv, Y. (2020, March 17). Indium distribution in sphalerite from sulfide–oxide–silicate skarn assemblages: a case study of the Dulong Zn–Sn–In deposit, Southwest China. *Mineralium Deposita*, 56, 307-324.
186. Zappettini, E. O. (2021). Minerales y metales críticos y estratégicos Análisis de situación y metodología de clasificación para la República Argentina. *Serie Contribuciones Técnicas, Recursos Minerales*, 45, 19. Retrieved from Repositorio SEGEMAR: [https://repositorio.segemar.gov.ar/bitstream/handle/308849217/4183/Serie%20Contribuciones%20T%C3%A9cnicas\\_Recurso%20Minerales\\_N%C2%BA%2045.pdf?sequence=5&isAllowed=y](https://repositorio.segemar.gov.ar/bitstream/handle/308849217/4183/Serie%20Contribuciones%20T%C3%A9cnicas_Recurso%20Minerales_N%C2%BA%2045.pdf?sequence=5&isAllowed=y)
187. Zhao, H., Wang, Y., & Cheng, H. (2023, January 26). Recent advances in lithium extraction from lithium-bearing clay minerals. *Hydrometallurgy*, 2017.

188. Zhaoa, Y., Zang, L., Li, Z., & Qin, J. (2012). Discussion on the Model of Mining Circular Economy. Energy Procedia, 16, 438-443.

## ANEXOS

ANEXO. 1 IMPORTACIONES TOTALES EN MILES DE DÓLARES POR PRODUCTO, LOS VALORES SE PRESENTAN EN MILES DE DÓLARES Y LOS PRODUCTOS SE ENCUENTRAN ORDENADOS DE ACUERDO CON SU PARTICIPACIÓN EN LA IMPORTACIÓN TOTAL. INFORMACIÓN OBTENIDA DE BANXICO.

Balanza de pagos (Importaciones)		
Productos	Importaciones Totales 2022 en miles de dólares	Lugar
Seda	1629	97
Peletería	4103	96
Manufacturas de cestería	13104	95
Objetos de arte y antigüedades	24362	94
Armas y municiones, deportivas	31780	93
Las demás fibras textiles vegetales	36746	92
Paraguas, sombrillas y bastones	42489	91
Materias trenzables y otros productos vegetales	46048	90
Tabaco y sucedáneos elaborados	53874	89
Corcho y sus manufacturas	59591	88
Lana y pelo hilados y tejidos de crin	61060	87
Plomo y sus manufacturas	74959	86
Manufacturas de cabello y artículos de plumas	77176	85
Instrumentos musicales	96032	84
Barcos y artefactos flotantes	111646	83
Pólvoras, explosivos y cerillos	176091	82
Plantas y productos de floricultura	180327	81
Estaño y sus manufacturas //	195054	80
Alfombras y revestimientos para el suelo de materia textil	203481	79
Productos fotográficos o cinematográficos	224088	78
Gomas, resinas, jugos, extractos vegetales	233979	77
Aeronaves y sus partes	255784	76
Animales vivos	282364	75
Sombreros, tocados y sus partes	296301	74
Otros productos de origen animal	315756	73

Tejidos especiales con mechón insertado	352459	72
Zinc y sus manufacturas	377734	71
Aparatos de relojería y sus partes	421925	70
Café, té, yerba mate y especias	455280	69
Níquel y sus manufacturas	475917	68
Los demás metales comunes y manufacturas	490850	67
Preparaciones de carne y animales acuáticos	645517	66
Hortalizas, plantas, raíces y tubérculos	654303	65
Cacao y sus preparaciones	664702	64
Productos de industrias gráficas	733014	63
Pieles y cueros	741181	62
Tejidos de punto	775777	61
Fibras sintéticas o artificiales discontinuas	870448	60
Guata, fieltro y cordelería	893949	59
Productos de la molinería	904355	58
Pescados, crustáceos y moluscos	926587	57
Preparaciones de cereales o leche	939374	56
Manufacturas de piedra o análogos	948593	55
Azúcares y artículos de confitería	958561	54
Los demás artículos textiles confeccionados	1036026	53
Telas revestidas, artículos técnicos textiles	1041381	52
Productos cerámicos	1120106	51
Sal, azufre, tierras y piedras	1121432	50
Manufacturas de cuero y de tripa	1140924	49
Algodón	1141006	48
Manufacturas diversas	1239456	47
Preparaciones de hortalizas, frutos, plantas	1244278	46
Bebidas y vinagre	1296715	45
Filamentos sintéticos o artificiales	1319906	44
Vehículos, material para vías férreas	1406398	43
Materias albuminoideas	1412563	42
Jabón, ceras, lubricantes y velas	1469738	41
Perlas, piedras y metales preciosos	1477613	40
Frutas y frutos comestibles	1507869	39
Pasta de madera o de materias fibrosas	1593306	38
Calzado polainas y análogos	1790156	37

Preparaciones alimenticias diversas	1914174	36
Vidrio y sus manufacturas	1997932	35
Minerales metalíferos, escorias	2226344	34
Prendas, accesorios de vestir excepto de punto	2330342	33
Residuos de industrias alimentarias	2401949	32
Grasas animales o vegetales	2509177	31
Herramientas y útiles de metal común	2607816	30
Madera, carbón vegetal y sus manufacturas	2967031	29
Leche, lácteos, huevos y miel	3078470	28
Extractos curtientes o tintóreos	3100716	27
Juguetes, artículos para recreo y deportes	3264200	26
Manufacturas diversas de metales comunes	3289921	25
Prendas, accesorios de vestir de punto	3470404	24
Abonos	3513535	23
Cobre y sus manufacturas	3750334	22
Aceites esenciales y resinoides	3993947	21
Productos químicos inorgánicos	4439873	20
Muebles; medicoquirúrgico; no expresados en otra parte	4612094	19
Carne y despojos comestibles	6007673	18
Semillas y frutos oleaginosos; frutos diversos	6244167	17
Productos farmacéuticos	6252410	16
Papel, cartón y sus manufacturas	7566614	15
Caucho y sus manufacturas	8800587	14
Cereales	8886124	13
Productos de las industrias químicas	9568200	12
Aluminio y sus manufacturas	11640041	11
Manufacturas de fundición de hierro o acero	12739435	10
Productos químicos orgánicos	13295824	9
Instrumentos y aparatos de óptica y médicos	18740400	8
Fundición, hierro y acero	20822193	7
Productos no clasificados	24481961	6
Plástico y sus manufacturas	32721370	5
Vehículos terrestres y sus partes	48287143	4
Combustibles minerales y sus productos	62903309	3
Aparatos mecánicos, calderas, partes	94223147	2

Máquinas y material eléctrico	117278518	1
<b>Importaciones totales</b>	<b>604614591</b>	

ANEXO. 2 EXPORTACIONES TOTALES EN MILES DE DÓLARES POR PRODUCTO, LOS VALORES SE PRESENTAN EN MILES DE DÓLARES Y LOS PRODUCTOS SE ENCUENTRAN ORDENADOS DE ACUERDO CON SU PARTICIPACIÓN EN LA EXPORTACIÓN TOTAL. INFORMACIÓN OBTENIDA DE BANXICO.

Balanza de pagos (exportaciones)		
Productos	Exportaciones Totales 2022 en miles de dólares	Lugar
Peletería	498	97
Las demás fibras textiles vegetales	2099	96
Seda	2419	95
Corcho y sus manufacturas	4354	94
Paraguas, sombrillas y bastones	4485	93
Manufacturas de cabello y artículos de plumas	6777	92
Pasta de madera o de materias fibrosas	9974	91
Objetos de arte y antigüedades	16202	90
Manufacturas de cestería	22690	89
Estaño y sus manufacturas	46381	88
Productos fotográficos o cinematográficos	46529	87
Lana y pelo hilados y tejidos de crin //	50092	86
Materias trenzables y otros productos vegetales	72030	85
Otros productos de origen animal	76337	84
Tejidos de punto	83643	83
Armas y municiones, deportivas //	99006	82
Aparatos de relojería y sus partes	106766	81
Tejidos especiales con mechón insertado	112179	80
Alfombras y revestimientos para el suelo de materia textil	131803	79
Plantas y productos de floricultura	132688	78
Instrumentos musicales	136808	77
Pólvoras, explosivos y cerillos	143392	76
Los demás metales comunes y manufacturas	143658	75
Gomas, resinas, jugos, extractos vegetales	153508	74
Fibras sintéticas o artificiales discontinuas	199938	73
Níquel y sus manufacturas //	243677	72
Tabaco y sucedáneos elaborados	250126	71

Preparaciones de carne y animales acuáticos	259332	70
Pieles y cueros	261503	69
Semillas y frutos oleaginosos; frutos diversos	265735	68
Sombreros, tocados y sus partes	266621	67
Plomo y sus manufacturas	269362	66
Materias albuminoideas //	294128	65
Productos de la molinería	311615	64
Filamentos sintéticos o artificiales	324312	63
Guata, fieltro y cordelería	355686	62
Telas revestidas, artículos técnicos textiles	357551	61
Abonos	368865	60
Leche, lácteos, huevos y miel	376410	59
Residuos de industrias alimentarias	463123	58
Productos de industrias gráficas	521577	57
Algodón	524395	56
Cereales	558626	55
Manufacturas de cuero y de tripa	565931	54
Zinc y sus manufacturas	613275	53
Aeronaves y sus partes	674026	52
Grasas animales o vegetales	695255	51
Animales vivos	696915	50
Cacao y sus preparaciones	770596	49
Sal, azufre, tierras y piedras	896156	48
Café, té, yerba mate y especias	918009	47
Calzado polainas y análogos	943653	46
Madera, carbón vegetal y sus manufacturas	953372	45
Pescados, crustáceos y moluscos	1050924	44
Extractos curtientes o tintóreos	1145312	43
Herramientas y útiles de metal común	1233675	42
Manufacturas de piedra o análogos	1347755	41
Barcos y artefactos flotantes	1408868	40
Jabón, ceras, lubricantes y velas	1446244	39
Productos cerámicos	1574476	38
Manufacturas diversas	1590757	37
Preparaciones alimenticias diversas	1606313	36
Productos químicos inorgánicos	1627550	35
Los demás artículos textiles confeccionados	1696036	34
Productos de las industrias químicas	2036556	33
Productos farmacéuticos	2180866	32
Preparaciones de hortalizas, frutos, plantas	2220861	31

Papel, cartón y sus manufacturas	2288119	30
Productos químicos orgánicos	2299058	29
Azúcares y artículos de confitería	2396842	28
Juguetes, artículos para recreo y deportes	2409575	27
Vidrio y sus manufacturas	2452282	26
Prendas, accesorios de vestir excepto de punto	2621713	25
Prendas, accesorios de vestir de punto	2638886	24
Aceites esenciales y resinoideos	2928559	23
Cobre y sus manufacturas	3046962	22
Manufacturas diversas de metales comunes	3060295	21
Aluminio y sus manufacturas	3149258	20
Carne y despojos comestibles	3183957	19
Preparaciones de cereales o leche	3355838	18
Vehículos, material para vías férreas	4180460	17
Caucho y sus manufacturas	4571925	16
Fundición, hierro y acero	6973450	15
Perlas, piedras y metales preciosos	8337646	14
Minerales metalíferos, escorias	8387460	13
Frutas y frutos comestibles	8733020	12
Productos no clasificados	8942348	11
Hortalizas, plantas, raíces y tubérculos	9222481	10
Manufacturas de fundición de hierro o acero	10067593	9
Bebidas y vinagre	11646749	8
Muebles; medicoquirúrgico; no expresados en otra parte	12783517	7
Plástico y sus manufacturas	13145881	6
Instrumentos y aparatos de óptica y médicos	22839433	5
Combustibles minerales y sus productos	37694492	4
Máquinas y material eléctrico	97325195	3
Aparatos mecánicos, calderas, partes	103006268	2
Vehículos terrestres y sus partes	136075854	1
<b>Exportaciones totales</b>	<b>577735396</b>	

ANEXO. 3 PRODUCCIÓN DE MINERALES EN EL 2021, PARTICIPACIÓN DE MÉXICO EN VOLÚMEN Y PORCENTAJE, ASÍ COMO EL MAYOR PRODUCCIÓN Y SU PORCENTAJE DE PARTICIPACIÓN.

Elemento o Compuesto	Unidad	Pruducción México 2021	Porcentaje producción a nivel mundial	Lugar a Nivel mundial 2021	Mayor Productor	Porcentaje de producción
<b>Fe</b>	t.métr.	<b>10800000</b>	<b>0.66</b>	<b>15 ↓</b>	<b>Australia</b>	<b>34.93%</b>
Cr2O3	t.métr.				Sudáfrica	51.82%
Co	t.métr.				R. D. Congo	69.17%
<b>Mn</b>	t.métr.	<b>220560</b>	<b>1.04</b>	<b>12 ↓</b>	<b>Sudáfrica</b>	<b>33.45%</b>
<b>Mo</b>	t.métr.	<b>16319</b>	<b>6.10%</b>	<b>5</b>	<b>China</b>	<b>38.32%</b>
Ni	t.métr.				Indonesia	41.72%
Nb2O5	t.métr.				Brasil	92.50%
Ta2O5	t.métr.				R. D. Congo	28.69%
TiO2	t.métr.				China	33.63%
W	t.métr.				China	77.55%
V	t.métr.				China	63.82%
Al	t.métr.				China	56.90%
<b>Sb</b>	t.métr.	<b>413</b>	<b>0.44%</b>	<b>9 ↑</b>	<b>China</b>	<b>44.13%</b>
As	t.métr.				China	43.72%
Bauxita	t.métr.				Australia	27.19%
Berilio (concentrado)	t.métr.				Estados Unidos	65.22%
Bi	t.métr.				China	71.79%
<b>Cd</b>	t.métr.	<b>1051</b>	<b>4.24%</b>	<b>6 ↑</b>	<b>China</b>	<b>40.37%</b>
<b>Cu</b>	t.métr.	<b>734137</b>	<b>3.43%</b>	<b>9</b>	<b>Chile</b>	<b>26.27%</b>
Ga	t.métr.				China	96.77%
Ge	t.métr.				China	92.96%
In	t.métr.				China	58.89%
<b>Pb</b>	t.métr.	<b>272231</b>	<b>5.82%</b>	<b>4 ↓</b>	<b>China</b>	<b>42.73%</b>
LiO2	t.métr.				Australia	48.85%
<b>Hg</b>	t.métr.	<b>40</b>	<b>2.41%</b>	<b>3</b>	<b>China</b>	<b>84.49%</b>
REO	t.métr.				China	62.41%
Re	t.métr.				Chile	44.24%
<b>Se</b>	t.métr.	<b>135</b>	<b>3.46</b>	<b>7 ↓</b>	<b>China</b>	<b>37.74%</b>
Te	t.métr.				China	72.21%
Sn	t.métr.				China	33.58%
<b>Zn</b>	t.métr.	<b>742926</b>	<b>5.75%</b>	<b>5 ↓</b>	<b>China</b>	<b>31.99%</b>
<b>Au</b>	kg	<b>124776</b>	<b>3.86%</b>	<b>6</b>	<b>China</b>	<b>10.17%</b>
Pd	kg				Sudáfrica	39.67%
Pt	kg				Sudáfrica	74.20%

Rh	kg				Sudáfrica	85.28%
<b>Ag</b>	<b>kg</b>	<b>6118000</b>	<b>23.59%</b>	<b>1</b>	<b>México</b>	<b>23.59%</b>
Asbesto	t.métr.				Rusia	58.03%
<b>Barita</b>	<b>t.métr.</b>	<b>320642</b>	<b>3.83%</b>	<b>5 ↓</b>	<b>India</b>	<b>29.87%</b>
<b>Bentonita</b>	<b>t.métr.</b>	<b>80000</b>	<b>43.00%</b>	<b>21 ↑</b>	<b>Estados Unidos</b>	<b>24.43%</b>
Minerales de Boro	t.métr.				Turquía	51.63%
Diamantes (gema)	ct				Rusia	31.15%
Diamantes (industrial)	ct				Rusia	36.45%
<b>Diatomita</b>	<b>t.métr.</b>	<b>160956</b>	<b>6.33%</b>	<b>5 ↓</b>	<b>Estados Unidos</b>	<b>39.23%</b>
<b>Feldespato</b>	<b>t.métr.</b>	<b>372102</b>	<b>1.04%</b>	<b>15 ↓</b>	<b>Turquía</b>	<b>36.10%</b>
<b>Fluorita</b>	<b>t.métr.</b>	<b>1007118</b>	<b>12%</b>	<b>2</b>	<b>China</b>	<b>64.35%</b>
<b>Grafito</b>	<b>t.métr.</b>	<b>1778</b>	<b>0.15%</b>	<b>14 ↓</b>	<b>China</b>	<b>62.96%</b>
<b>Yeso y anhidrita</b>	<b>t.métr.</b>	<b>6386777</b>	<b>3.70%</b>	<b>8</b>	<b>China</b>	<b>14.47%</b>
<b>Caolín (arcilla china)</b>	<b>t.métr.</b>	<b>223332</b>	<b>0.52%</b>	<b>24 ↓</b>	<b>India</b>	<b>16.46%</b>
Magnesita	t.métr.				China	64.26%
Perlita	t.métr.				Turquía	38.59%
<b>Roca fosfatada</b>	<b>t.métr.</b>	<b>136900</b>	<b>18.00%</b>	<b>24 ↓</b>	<b>China</b>	<b>40.96%</b>
K2O	t.métr.				Canadá	29.00%
<b>Sal (roca, salmueras y marina)</b>	<b>t.métr.</b>	<b>7644755</b>	<b>2.79%</b>	<b>10 ↓</b>	<b>China</b>	<b>20.84%</b>
<b>Sulfuro (elemental e industrial)</b>	<b>t.métr.</b>	<b>219439</b>	<b>29.00%</b>	<b>35 ↓</b>	<b>China</b>	<b>20.48%</b>
<b>Talco, steatita y pirofilita</b>	<b>t.métr.</b>	<b>29000</b>	<b>38.00%</b>	<b>25 ↓</b>	<b>India</b>	<b>20.47%</b>
<b>Vermiculita</b>	<b>t.métr.</b>	<b>100</b>	<b>0.02%</b>	<b>11 ↓</b>	<b>Sudáfrica</b>	<b>42.08%</b>
Zircón	t.métr.				Australia	39.08%
<b>Carbón térmico</b>	<b>t.métr.</b>	<b>2831000</b>	<b>0.05%</b>	<b>21 ↓</b>	<b>China</b>	<b>52.84%</b>
<b>Carbón de coque</b>	<b>t.métr.</b>	<b>4165000</b>	<b>0.39%</b>	<b>14</b>	<b>China</b>	<b>54.16%</b>
Lignito	t.métr.				Alemania	18.38%
Uranio	t.métr.				Kazajistán	45.82%

ANEXO. 4 ESTABILIDAD POLÍTICA DE LOS PAÍSES PRODUCTORES, DE CADA ELEMENTO O PRODUCTO MINERAL.

Elemento	Estabilidad Política				Total
	Estable	Mediano	Inestable	Extremadamente inestable	
<b>Fe</b>	0.13	41.61	<b>56.00</b>	2.25	100.00
Cr2O3	0	6.15	<b>92.82</b>	1.02	100.00
Co	0	11.04	19.80	<b>69.17</b>	100.00
<b>Mn</b>	0	21.54	<b>76.93</b>	1.52	100.00
<b>Mo</b>	0	35.83	<b>62.62</b>	1.55	100.00
Ni	0	15.35	<b>84.01</b>	0.64	100.00
Nb2O5	0	6.41	<b>93.07</b>	0.53	100.00
Ta2O5	0	19.03	38.69	<b>42.27</b>	100.00
TiO2	0	19.43	<b>80.49</b>	0.08	100.00
W	0	4.44	<b>95.23</b>	0.34	100.00
V	0	0	<b>100.00</b>	0	100.00
Al	1.52	20.07	<b>77.49</b>	0.91	100.00
<b>Sb</b>	0	3.85	<b>90.97</b>	5.17	100.00
As	0	0.07	<b>99.93</b>	0	100.00
Bauxita	0	29.37	<b>70.36</b>	0.26	100.00
Berilio (concentrado)	0	<b>65.60</b>	34.40	0	100.00
Bi	0	4.52	<b>95.48</b>	0	100.00
<b>Cd</b>	0	41.46	<b>58.54</b>	0	100.00
<b>Cu</b>	0	<b>49.11</b>	39.41	11.47	100.00
Ga	0	1.15	<b>98.85</b>	0	100.00
Ge	0	2.82	<b>97.18</b>	0	100.00
In	0	37.08	<b>62.92</b>	0	100.00
<b>Pb</b>	0	23.13	<b>73.88</b>	2.99	100.00
LiO2	0	<b>78.01</b>	21.98	0.01	100.00
<b>Hg</b>	0	0.91	<b>99.09</b>	0	100.00
REO	0	23.93	<b>65.96</b>	10.12	100.00
Re	0	<b>81.11</b>	18.89	0	100.00
<b>Se</b>	0	37.28	<b>62.72</b>	0	100.00
Te	0	18.94	<b>81.06</b>	0	100.00
Sn	0	6.29	<b>72.80</b>	20.91	100.00
<b>Zn</b>	0	24.94	<b>72.86</b>	2.20	100.00
<b>Au</b>	0.18	30.13	<b>63.97</b>	5.72	100.00
Pd	0	14.30	<b>85.70</b>	0	100.00
Pt	0	6.04	<b>93.96</b>	0	100.00
Rh	0	2.53	<b>97.47</b>	0	100.00
<b>Ag</b>	0.01	24.74	<b>75.02</b>	0.23	100.00

Asbesto	0	0.00	<b>100.00</b>	0	100.00
Barita	0	5.93	<b>89.87</b>	4.20	100.00
Bentonita	0	40.23	<b>53.31</b>	6.46	100.00
Minerales de Boro	0	25.67	<b>74.29</b>	0.04	100.00
Diamantes (gema)	0	46.10	<b>50.35</b>	3.54	100.00
Diamantes (industrial)	0	16.07	<b>59.71</b>	24.23	100.00
Diatomita	0	<b>56.96</b>	42.62	0.41	100.00
Feldespato	0	17.09	<b>73.60</b>	9.31	100.00
Fluorita	0	10.86	<b>88.20</b>	0.94	100.00
Grafito	0	2.79	<b>97.21</b>	0	100.00
Yeso y anhidrita	0	44.02	<b>45.21</b>	10.77	100.00
Caolín (arcilla china)	0.13	37.90	<b>58.77</b>	3.20	100.00
Magnesita	0	15.82	<b>83.24</b>	0.94	100.00
Perlita	0	52.50	<b>45.42</b>	2.08	100.00
Roca fosfatada	0	8.83	<b>90.07</b>	1.10	100.00
Potasa K2O	0	40.43	<b>59.48</b>	0.09	100.00
Sal (roca, salmueras y marina)	0.04	47.03	<b>49.99</b>	2.94	100.00
Sulfuro (elemental e industrial)	0	46.44	<b>50.28</b>	3.28	100.00
Talco, steatita y pirofilita	0	31.39	<b>57.24</b>	11.37	100.00
Vermiculita	0	19.38	<b>80.62</b>	0	100.00
Zircón	0	41.24	<b>58.55</b>	0.21	100.00
Carbón térmico	0.02	12.49	<b>87.27</b>	0.22	100.00
Carbón de coque	0.11	27.25	<b>72.29</b>	0.35	100.00
Lignito	0.04	<b>56.29</b>	43.58	0.09	100.00
Uranio	0	41.24	<b>58.55</b>	0.21	100.00

ANEXO. 5 CONCENTRACIONES DE ELEMENTOS EN JALES Y ENRIQUECIMIENTOS DE LOS ELEMENTOS NORMALIZADOS CON LOS VALORES DE LA CORTEZA CONTINENTAL SUPERIOR (UCC).

Elementos	Unidad	Medidos	R&G. UCC	Medidos/UCC
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	21.80	15.4	1.415
FeO	%	11.57	5.04	2.295
MnO	%	0.086	0.1	0.860
MgO	%	0.55	2.48	0.220
Na <sub>2</sub> O	%	1.00	3.27	0.307
CaO	%	2.24	3.59	0.625
K <sub>2</sub> O	%	4.27	2.8	1.524
TiO <sub>2</sub>	%	0.46	0.64	0.714
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0.39	0.15	2.593
Sc	ppm	9.22	14	0.659
Be	ppm	1.71	2.1	0.814
V	ppm	96.90	97	0.999
Ba	ppm	427.40	624	0.685
Sr	ppm	133.34	320	0.417
Y	ppm	25.29	21	1.204
Zr	ppm	73.40	193	0.380
Cr	ppm	57.50	92	0.625
Co	ppm	20.82	17.3	1.203
Ni	ppm	18.38	47	0.391
Cu	ppm	2817.00	28	100.607
Zn	ppm	699.10	67	10.434
Ga	ppm	24.62	17.5	1.407
Ge	ppm	0.15	1.4	0.107
As	ppm	225.44	4.8	46.967
Rb	ppm	127.55	84	1.518
Nb	ppm	5.64	12	0.470
Mo	ppm	118.30	1.1	107.545
Ag	ppm	7.52	0.053	141.962
In	ppm	9.04	0.056	161.429
Sn	ppm	23.10	2.1	11.000
Sb	ppm	63.57	0.4	158.925
Cs	ppm	9.54	4.9	1.946
La	ppm	38.82	31	1.252
Ce	ppm	80.67	63	1.280
Pr	ppm	9.62	7.1	1.355
Nd	ppm	43.00	27	1.593
Sm	ppm	8.95	4.7	1.904
Eu	ppm	1.64	1	1.637
Gd	ppm	6.41	4	1.603
Tb	ppm	0.29	0.7	0.414
Dy	ppm	4.92	3.9	1.262
Ho	ppm	0.88	0.83	1.060

Er	ppm	2.48	2.3	1.078
Tm	ppm	0.33	0.3	1.100
Yb	ppm	2.32	2	1.160
Lu	ppm	0.25	0.31	0.806
Hf	ppm	2.11	5.3	0.398
Ta	ppm	0.23	0.9	0.256
W	ppm	57.89	1.9	30.468
Tl	ppm	1.86	0.9	2.061
Pb	ppm	755.12	17	44.419
Bi	ppm	18.07	0.16	112.938
Th	ppm	9.65	10.5	0.919
U	ppm	5.90	2.7	2.185
Au	ppm	0.09	0.0015	61.133
Cd	ppm	2.99	0.09	33.222
S	ppm	38220	621	61.546
Br	ppm	0.74	1.6	0.463
Re	ppm	0.20	0.000198	1006.566
Se	ppm	2.50	0.09	27.778
Li	ppm	16.00	21	0.762

ANEXO. 6 CONCENTRACIONES DE ELEMENTOS EN JALES Y ENRIQUECIMIENTOS DE LOS ELEMENTOS NORMALIZADOS CON LOS VALORES DE FONDO DE CANANEA, SONORA (SRUB).

Elementos/Óxidos	Unidad	Calmus et al.		Medidos/SRUB
		Medidos	SRUB	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	21.80	13.73	1.587
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	25.71	4.06	6.332
MnO	%	0.09	0.08	1.076
MgO	%	0.55	1.58	0.345
Na <sub>2</sub> O	%	1.00	2.61	0.384
CaO	%	2.24	4.78	0.470
K <sub>2</sub> O	%	4.27	3.2	1.334
TiO <sub>2</sub>	%	0.46	0.56	0.816
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0.39	0.17	2.288
Sc	ppm	9.22	8.57	1.076
Be	ppm	1.71	2.16	0.792
V	ppm	96.90	73.39	1.320
Ba	ppm	427.40	926.34	0.461
Sr	ppm	133.34	478.61	0.279
Y	ppm	25.29	22.32	1.133
Zr	ppm	73.40	181.03	0.405
Cr	ppm	57.50	42.98	1.338
Co	ppm	20.82	9.15	2.275
Ni	ppm	18.38	17.48	1.051
Cu	ppm	2817	19.72	142.850
Zn	ppm	699.10	76.31	9.161
Ga	ppm	24.62	16.5	1.492
Ge	ppm	0.15	1.39	0.108
As	ppm	225.44	17.91	12.587
Rb	ppm	127.55	121.8	1.047
Nb	ppm	5.64	10.48	0.538
Mo	ppm	118.30	1.2	98.583
Ag	ppm	7.52	0.55	13.680
In	ppm	9.04	0.1	90.400
Sn	ppm	23.10	1.3	17.769
Sb	ppm	63.57	3.31	19.205
Cs	ppm	9.54	10.28	0.928
La	ppm	38.82	34.39	1.129
Ce	ppm	80.67	66.9	1.206
Pr	ppm	9.62	7.42	1.296
Nd	ppm	43.00	27.03	1.591
Sm	ppm	8.95	5.01	1.786
Eu	ppm	1.64	1.1	1.488
Gd	ppm	6.41	4.26	1.505
Tb	ppm	0.29	0.62	0.468
Dy	ppm	4.92	3.56	1.382
Ho	ppm	0.88	0.71	1.239

Er	ppm	2.48	2.06	1.204
Tm	ppm	0.33	0.31	1.065
Yb	ppm	2.32	2.1	1.105
Lu	ppm	0.25	0.34	0.735
Hf	ppm	2.11	4.75	0.444
Ta	ppm	0.23	0.91	0.253
W	ppm	57.89	3.38	17.127
Tl	ppm	1.86	0.54	3.435
Pb	ppm	755.12	23.14	32.633
Bi	ppm	18.07	0.29	62.310
Th	ppm	9.65	13.79	0.700
U	ppm	5.90	3.77	1.565

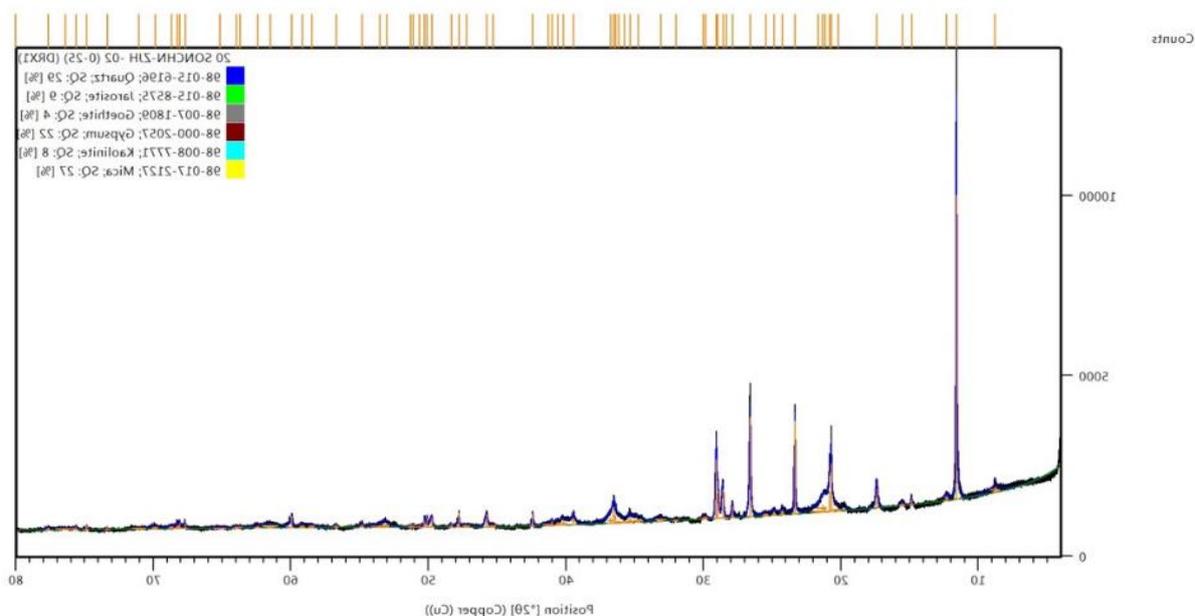
ANEXO. 7 TABLA DE CONVERSIÓN DE TIERRAS RARAS A ÓXIDOS Y CÁLCULO DE EL FACTOR DE CONVERSIÓN.

Elemento	Símbolo	UCC (ppm)	Número atómico	Óxidos	PA elemento	PA elemento (2)	PA oxígeno	PM óxidos	Factor de Conversión
Itrio	Y	22	39	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	88.91	177.82	15.9994	225.8182	1.270
Lantano	La	30	57	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	138.91	277.82	15.9994	325.8182	1.173
Cerio	Ce	64	58	CeO <sub>2</sub>	140.12	140.12	15.9994	172.1188	1.228
Praseodimio	Pr	7.1	59	Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	140.91	845.46	15.9994	1021.4534	1.208
Neodimio	Nd	26	60	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	144.24	288.48	15.9994	336.4782	1.166
Samarario	Sm	4.5	62	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	150.36	300.72	15.9994	348.7182	1.160
Europio	Eu	0.88	63	Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	151.96	303.92	15.9994	351.9182	1.158
Gadolinio	Gd	3.8	64	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	157.25	314.5	15.9994	362.4982	1.153
Terbio	Tb	0.64	65	Tb <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	158.93	635.72	15.9994	779.7146	1.227
Disprosio	Dy	3.5	66	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	162.5	325	15.9994	372.9982	1.148
Holmio	Ho	0.8	67	Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	164.93	329.86	15.9994	377.8582	1.146
Erbio	Er	2.3	68	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	167.26	334.52	15.9994	382.5182	1.143
Tulio	Tm	0.33	69	Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	169.93	339.86	15.9994	387.8582	1.141
Iterbio	Yb	2.2	70	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	173.04	346.08	15.9994	394.0782	1.139
Lutecio	Lu	0.32	71	Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	174.97	349.94	15.9994	397.9382	1.137

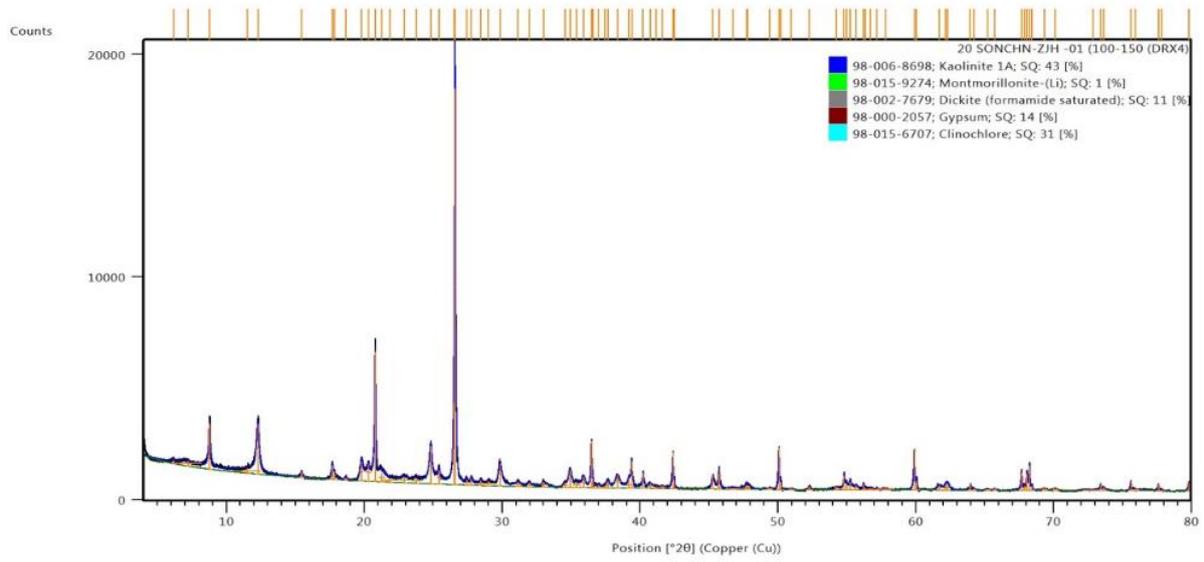
ANEXO. 8 CÁLCULO DE TREO (SUMATORIA DE LAS CONCENTRACIONES DE TIERRAS RARAS) EN LOS JALES DE CANANEA, SONORA.

Elemento	Símbolo	UCC (ppm)	Óxidos	Concentración jales (ppm)	wt%	wt% óxidos
Itrio	Y	22	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25.29	0.002529	0.00321164
Lantano	La	30	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	38.82	0.003882	0.00455268
Cerio	Ce	64	CeO <sub>2</sub>	80.67	0.008067	0.00990924
Praseodimio	Pr	7.1	Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	9.62	0.000962	0.00116225
Neodimio	Nd	26	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	43	0.0043	0.00501545
Samarario	Sm	4.5	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.95	0.000895	0.00103785
Europio	Eu	0.88	Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.637	0.0001637	0.00018955
Gadolinio	Gd	3.8	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.41	0.000641	0.00073883
Terbio	Tb	0.64	Tb <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	0.82	0.000082	0.00010057
Disproseo	Dy	3.5	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.92	0.000492	0.00056466
Holmio	Ho	0.8	Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.88	0.000088	0.0001008
Erbio	Er	2.3	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.48	0.000248	0.00028358
Tulio	Tm	0.33	Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.33	0.000033	3.7661E-05
Iterbio	Yb	2.2	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.32	0.000232	0.00026418
Lutecio	Lu	0.32	Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.25	0.000025	2.8429E-05
					<b>TREO</b>	<b>0.02719739</b>

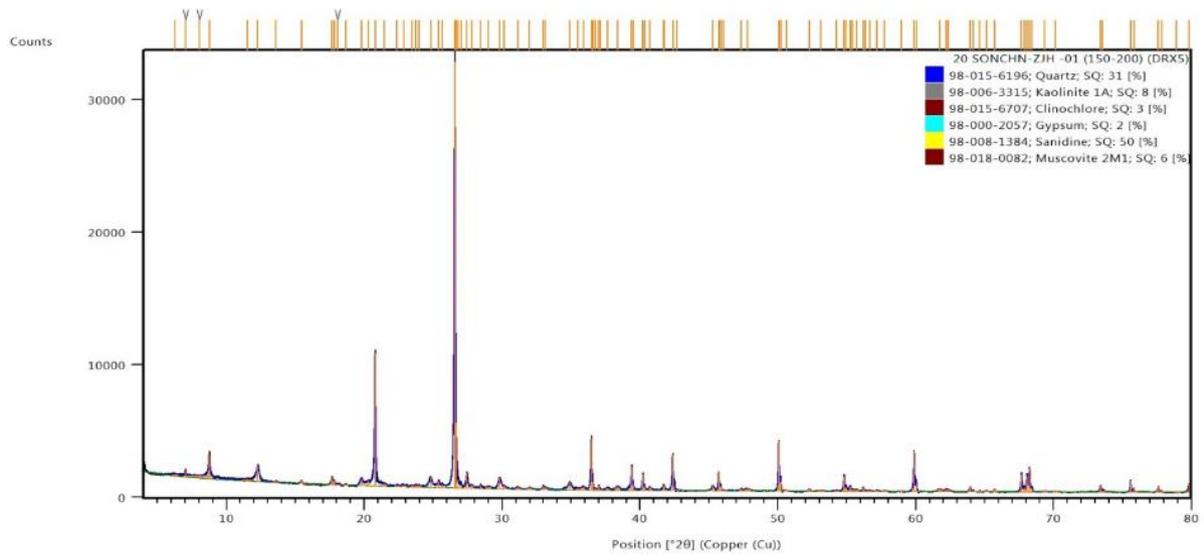
ANEXO. 9 DIFRACTOGRAMA DE MUESTRA DE ZANJA DE PROFUNDIDAD 2(0-25 CM).



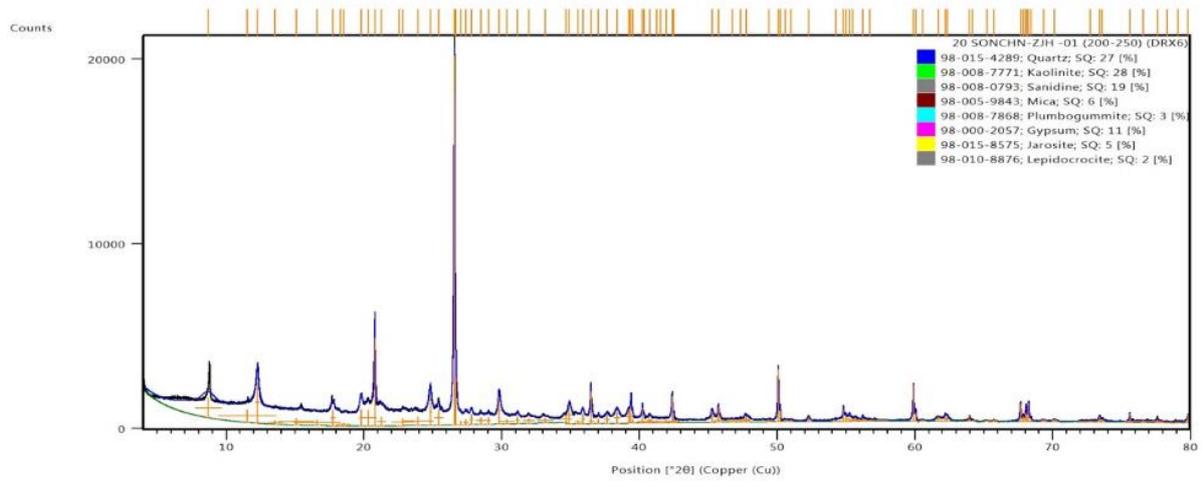
ANEXO. 10 DIFRACTOGRAMA DE MUESTRA DE ZANJA DE PROFUNDIDAD (100-150 CM).



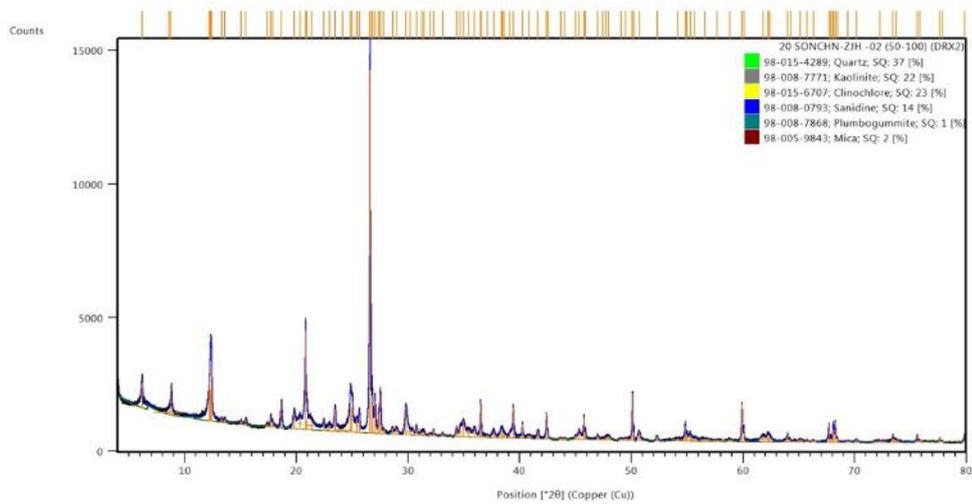
ANEXO. 11 DIFRACTOGRAMA DE MUESTRA DE ZANJA DE PROFUNDIDAD (150-200).



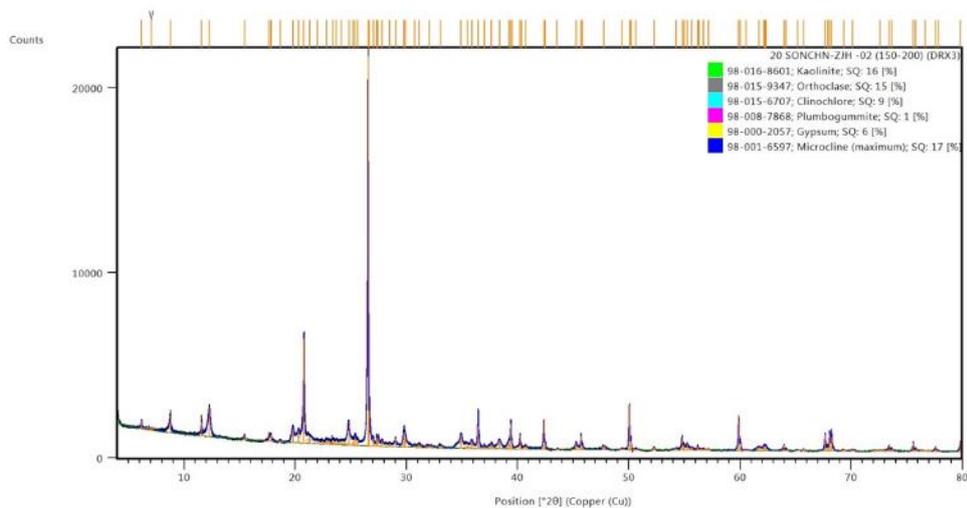
ANEXO. 12 DIFRACTOGRAMA DE MUESTRA DE ZANJA DE PROFUNDIDAD (200-250).



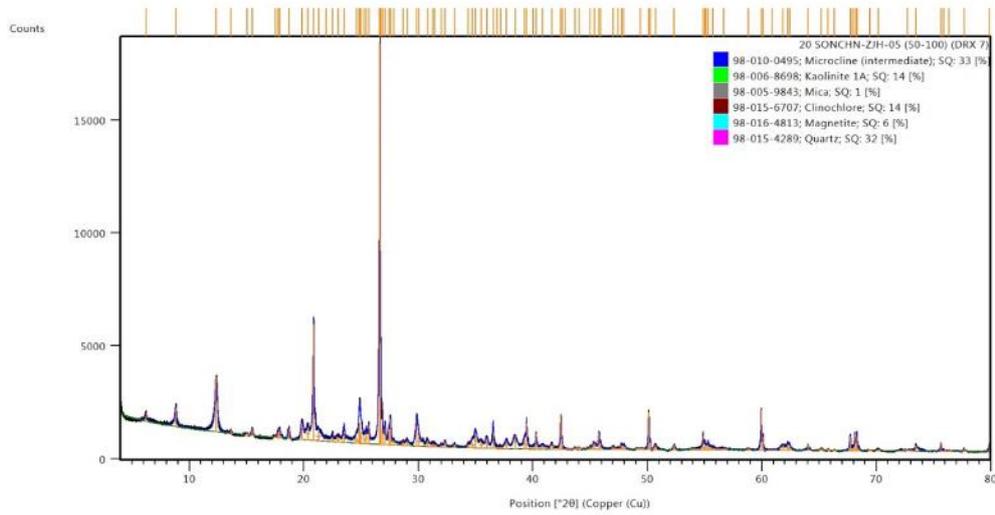
ANEXO. 13 DIFRACTOGRAMA DE MUESTRA DE ZANJA DE PROFUNDIDAD 2(50-100 CM).



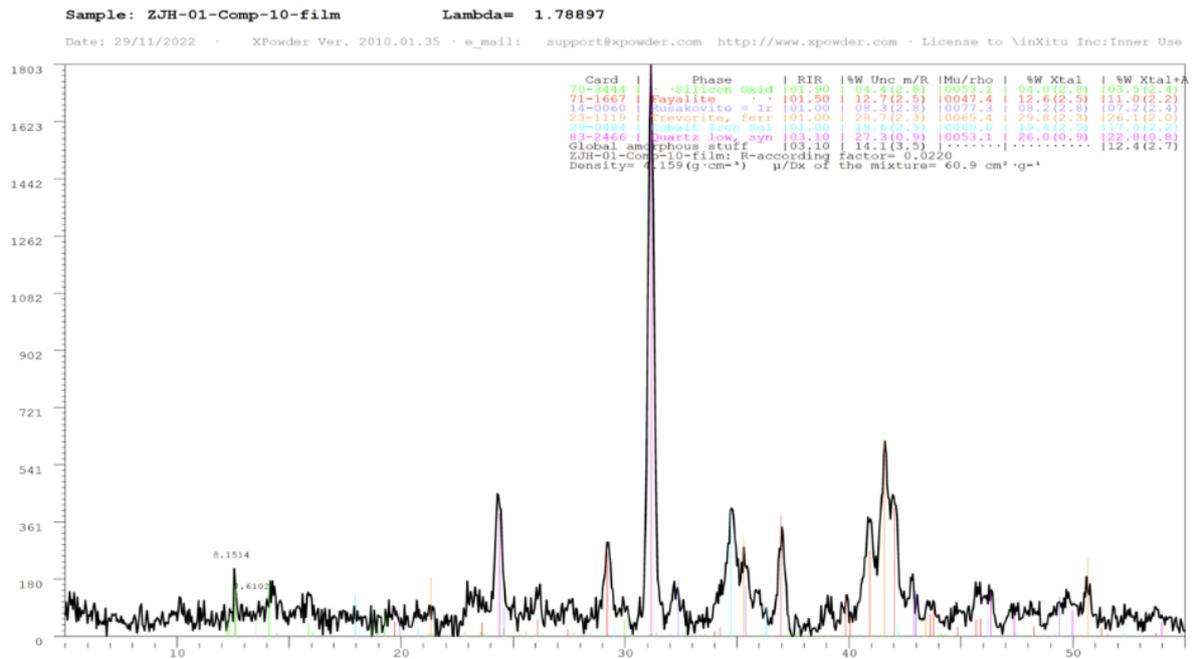
ANEXO. 14 DIFRACTOGRAMA DE MUESTRA DE ZANJA DE PROFUNDIDAD 2(150-200 CM).



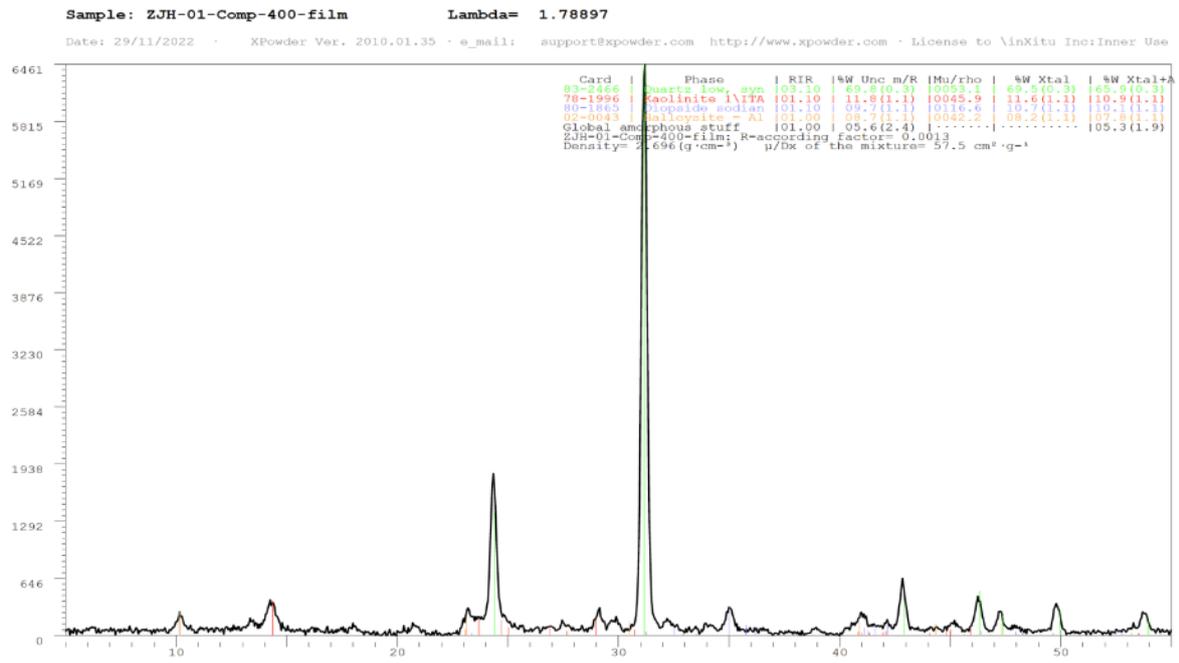
ANEXO. 15 DIFRACTOGRAMA DE MUESTRA DE ZANJA DE PROFUNDIDAD (50-100 CM).



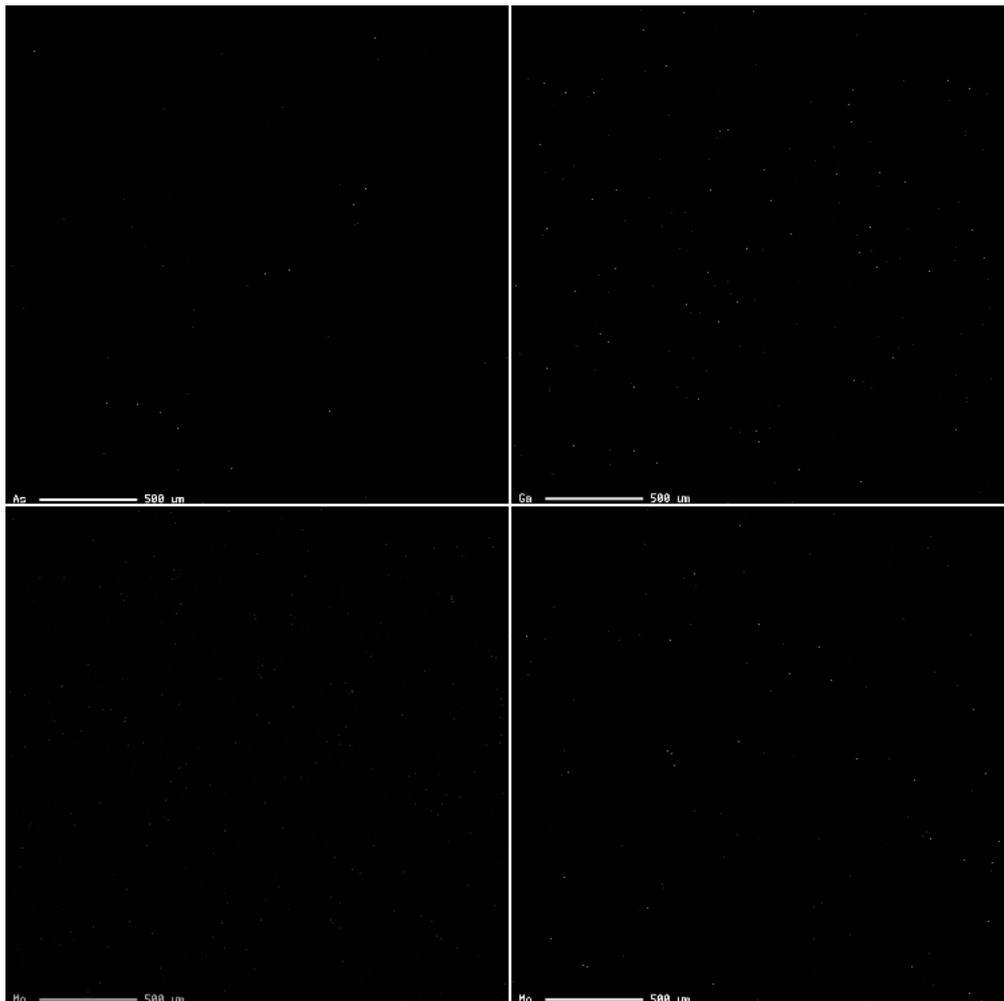
ANEXO. 16 DIFRACTOGRAMA DE FRACCIÓN DE MUESTRA DE ZANJA >2 MILÍMETROS.



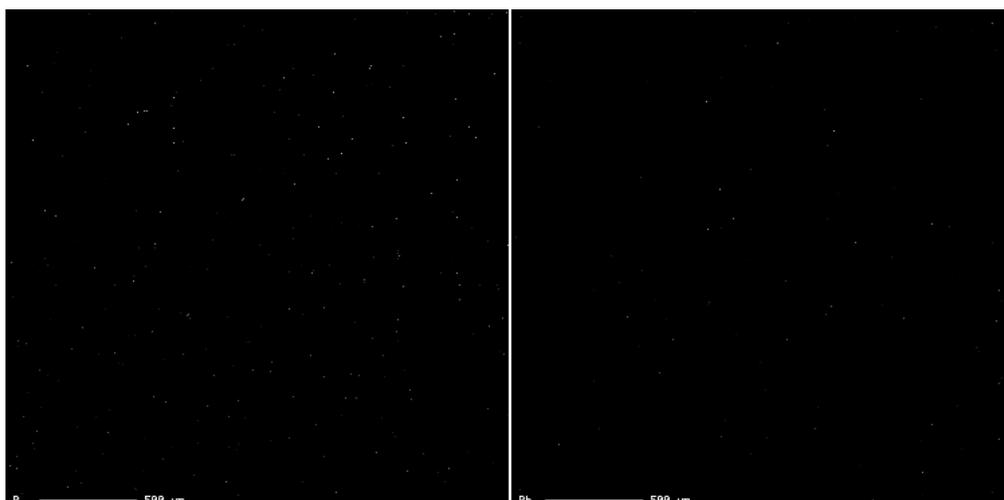
ANEXO. 17 DIFRACTOGRAMA DE FRACCIÓN DE MUESTRA DE ZANJA 0.037-0.074 MILÍMETROS



ANEXO. 18 MAPEOS ELEMENTALES DE ELEMENTOS DISPERSOS EN FRACCIÓN >2MM (AS, MN, MO, GA).



ANEXO. 19 MAPEOS ELEMENTALES DE ELEMENTOS DISPERSOS EN FRACCIÓN >2MM (P Y PB).



ANEXO. 20 CONCENTRACIONES DE ELEMENTOS EN SUELOS CONTAMINADOS Y ENRIQUECIMIENTOS CON RESPECTO A LAS CONCENTRACIONES EN LA CORTEZA CONTINENTAL SUPERIOR.

Elementos	Unidad	Concentraciones Suelos Contaminados	R&G. UCC	MedidosSC/UCC
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	8.70	15.4	0.56
FeO	%	<b>5.22</b>	5.04	1.04
MnO	%	<b>0.19</b>	0.1	1.91
MgO	%	<b>0.85</b>	2.48	0.34
CaO	%	<b>29.59</b>	3.59	8.24
K <sub>2</sub> O	%	<b>1.31</b>	2.8	0.47
TiO <sub>2</sub>	%	<b>0.31</b>	0.64	0.49
V	ppm	<b>75.83</b>	97	0.78
Ba	ppm	<b>385.83</b>	624	0.62
Sr	ppm	<b>266.50</b>	320	0.83
Y	ppm	<b>12.78</b>	21	0.61
Cr	ppm	<b>83.33</b>	92	0.91
Co	ppm	<b>14.95</b>	17.3	0.86
Ni	ppm	<b>36.67</b>	47	0.78
Cu	ppm	<b>6438.17</b>	28	229.93
Zn	ppm	<b>7560.00</b>	67	112.84
Ga	ppm	<b>8.53</b>	17.5	0.49
Ge	ppm	<b>2.75</b>	1.4	1.96
As	ppm	<b>25662.67</b>	4.8	5346.39
Rb	ppm	<b>51.77</b>	84	0.62
Nb	ppm	<b>6.43</b>	12	0.54
Mo	ppm	<b>11.33</b>	1.1	10.30
Ag	ppm	<b>209.92</b>	0.053	3960.74
In	ppm	<b>1.47</b>	0.056	26.19

Sn	ppm	<b>299.93</b>	2.1	142.83
Sb	ppm	<b>1174.67</b>	0.4	2936.67
Cs	ppm	<b>5.43</b>	4.9	1.11
La	ppm	<b>12.60</b>	31	0.41
Ce	ppm	<b>23.22</b>	63	0.37
Pr	ppm	<b>3.07</b>	7.1	0.43
Nd	ppm	<b>13.32</b>	27	0.49
Sm	ppm	<b>2.45</b>	4.7	0.52
Eu	ppm	<b>0.58</b>	1	0.58
Gd	ppm	<b>1.92</b>	4	0.48
Tb	ppm	<b>0.32</b>	0.7	0.45
Dy	ppm	<b>2.02</b>	3.9	0.52
Ho	ppm	<b>0.42</b>	0.83	0.50
Er	ppm	<b>1.22</b>	2.3	0.53
Tm	ppm	<b>0.20</b>	0.3	0.67
Yb	ppm	<b>1.28</b>	2	0.64
Ta	ppm	<b>0.87</b>	0.9	0.96
W	ppm	<b>8.68</b>	1.9	4.57
Tl	ppm	<b>5.83</b>	0.9	6.48
Pb	ppm	<b>19263.80</b>	17	1133.16
Bi	ppm	<b>281.33</b>	0.16	1758.33
Th	ppm	<b>3.53</b>	10.5	0.34
U	ppm	<b>1.88</b>	2.7	0.70
Cd	ppm	<b>542.17</b>	0.09	6024.07
S	ppm	<b>12600.00</b>	621	20.29
Se	ppm	<b>76.83</b>	0.09	853.70
Li	ppm	<b>20.50</b>	21.00	0.98

ANEXO. 21 CONCENTRACIONES DE ELEMENTOS EN ESCORIAS Y ENRIQUECIMIENTOS CON RESPECTO A LAS CONCENTRACIONES EN LA CORTEZA CONTINENTAL SUPERIOR.

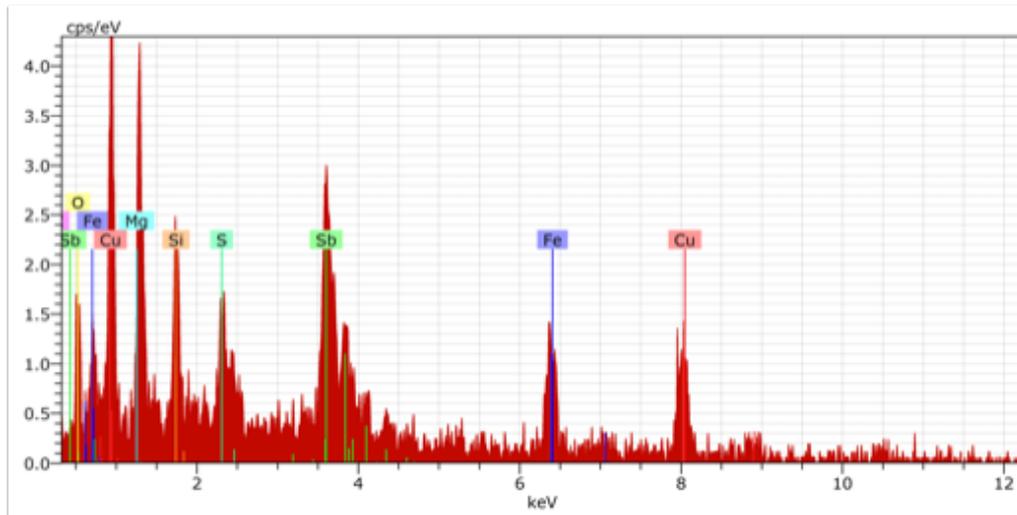
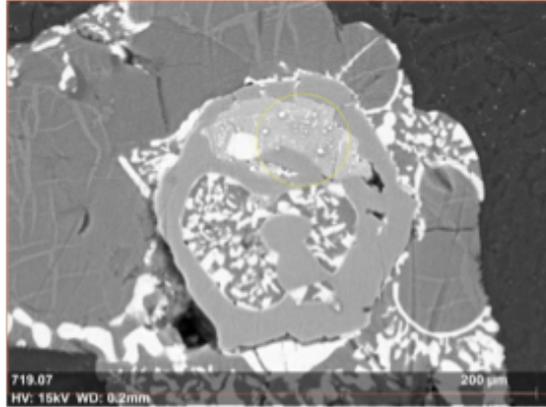
Elementos	Unidad	Concentraciones promedio	
		Escorias	R&G. UCC
Al2O3	%	8.45	15.4
FeO	%	24.83	5.04
MnO	%	0.78	0.1
MgO	%	1.01	2.48
CaO	%	20.74	3.59
K2O	%	2.38	2.8
TiO2	%	0.25	0.64
V	ppm	89.80	97
Ba	ppm	1806.40	624
Sr	ppm	285.40	320
Y	ppm	12.00	21
Cr	ppm	58.00	92
Co	ppm	36.68	17.3
Ni	ppm	22.00	47
Cu	ppm	2354.00	28
Zn	ppm	28040.00	67
Ga	ppm	15.24	17.5
Ge	ppm	6.82	1.4
As	ppm	1370.40	4.8
Rb	ppm	69.34	84
Nb	ppm	4.42	12
Mo	ppm	50.80	1.1
Ag	ppm	40.13	0.053
In	ppm	3.72	0.056
Sn	ppm	330.60	2.1
Sb	ppm	437.40	0.4
Cs	ppm	4.18	4.9
La	ppm	14.60	31
Ce	ppm	24.92	63
Pr	ppm	3.32	7.1
Nd	ppm	14.36	27
Sm	ppm	2.74	4.7
Eu	ppm	1.10	1
Gd	ppm	1.20	4
Tb	ppm	0.28	0.7
Dy	ppm	1.90	3.9
Ho	ppm	0.36	0.83
Er	ppm	1.14	2.3
Tm	ppm	0.12	0.3
Yb	ppm	1.28	2
Ta	ppm	0.48	0.9
W	ppm	125.48	1.9

Tl	ppm	0.30	0.9	0.33
Pb	ppm	3846.00	17	226.24
Bi	ppm	17.80	0.16	111.25
Th	ppm	3.40	10.5	0.32
U	ppm	4.60	2.7	1.70
Cd	ppm	13.80	0.09	153.33
S	ppm	4440.00	621	7.15
Se	ppm	9.67	0.09	107.41
Li	ppm	23.60	21.00	1.12

ANEXO. 22 CONVERSIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS ELEMENTOS EN LAS ESCORIAS DE PPM A WT. % DE LOS ÓXIDOS DE REE.

Elemento	Símbolo	UCC (ppm)	Concentración Escorias (ppm)	wt%	Factor de Conversión	wt% óxidos
Itrio	Y	22	12	0.0012	1.270	0.00152391
Lantano	La	30	14.6	0.00146	1.173	0.00171224
Cerio	Ce	64	24.92	0.002492	1.228	0.00306109
Praseodimio	Pr	7.1	3.32	0.000332	1.208	0.00040111
Neodimio	Nd	26	14.36	0.001436	1.166	0.00167493
Samario	Sm	4.5	2.74	0.000274	1.160	0.00031773
Europio	Eu	0.88	1.1	0.00011	1.158	0.00012737
Gadolinio	Gd	3.8	1.2	0.00012	1.153	0.00013831
Terbio	Tb	0.64	0.28	0.000028	1.227	3.4342E-05
Disproso	Dy	3.5	1.9	0.00019	1.148	0.00021806
Holmio	Ho	0.8	0.36	0.000036	1.146	4.1238E-05
Erbio	Er	2.3	1.14	0.000114	1.143	0.00013036
Tulio	Tm	0.33	0.12	0.000012	1.141	1.3695E-05
Iterbio	Yb	2.2	1.28	0.000128	1.139	0.00014575
Lutecio	Lu	0.32	0	0	1.137	0
					TREO	0.00954014

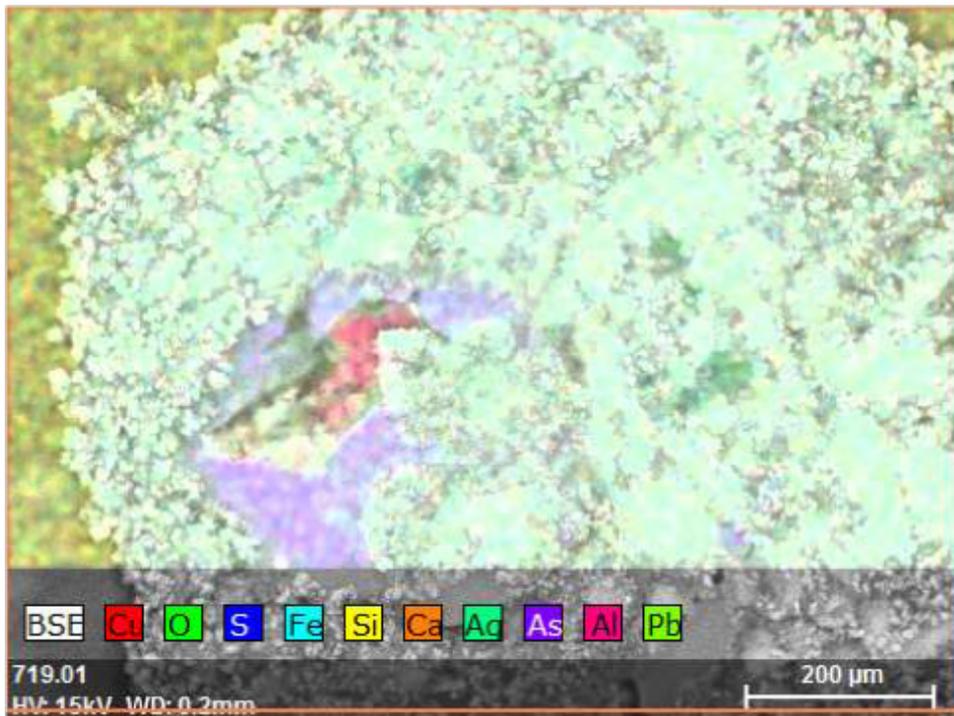
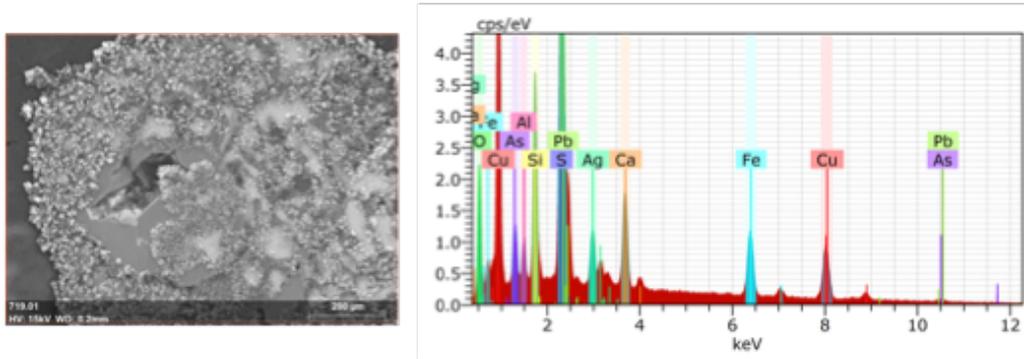
ANEXO. 23 ANÁLISIS CON EDS EN ESCORIAS PULIDAS. EL SITIO ANALIZADO SE MUESTRA CON UN CÍRCULO AMARILLO. ZONA DE ESTUDIO CON ALTAS CONCENTRACIONES DE SB.



Spectrum: Point

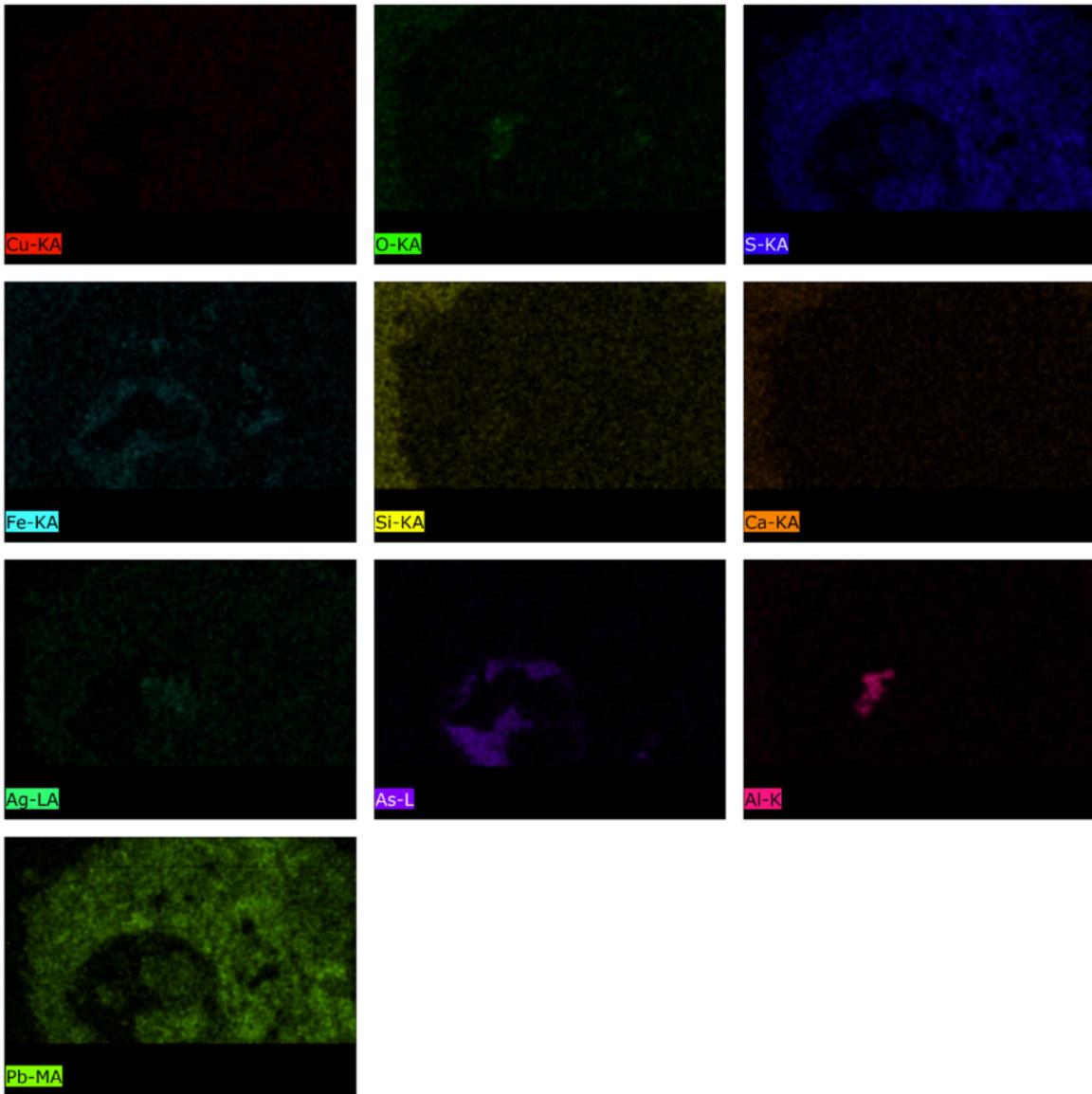
Element	AN	Series	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]
Cobre	29	K-series	27.91	16.56
Antimonio	51	L-series	22.40	6.94
Hierro	26	K-series	15.46	10.44
Magnesio	12	K-series	11.20	17.38
Carbono	6	K-series	7.14	22.42
Silicio	14	K-series	6.20	8.33
Oxigeno	8	K-series	5.54	13.06
Azufre	16	K-series	4.14	4.87
Total:			100.00	100.00

ANEXO. 24 MAPEO ELEMENTAL DE ESCORIAS PULIDAS DE LAS INCLUSIONES POLIMETÁLICAS, REALIZADO POR MICROSCOPIO ELECTRÓNICO Y EDS.

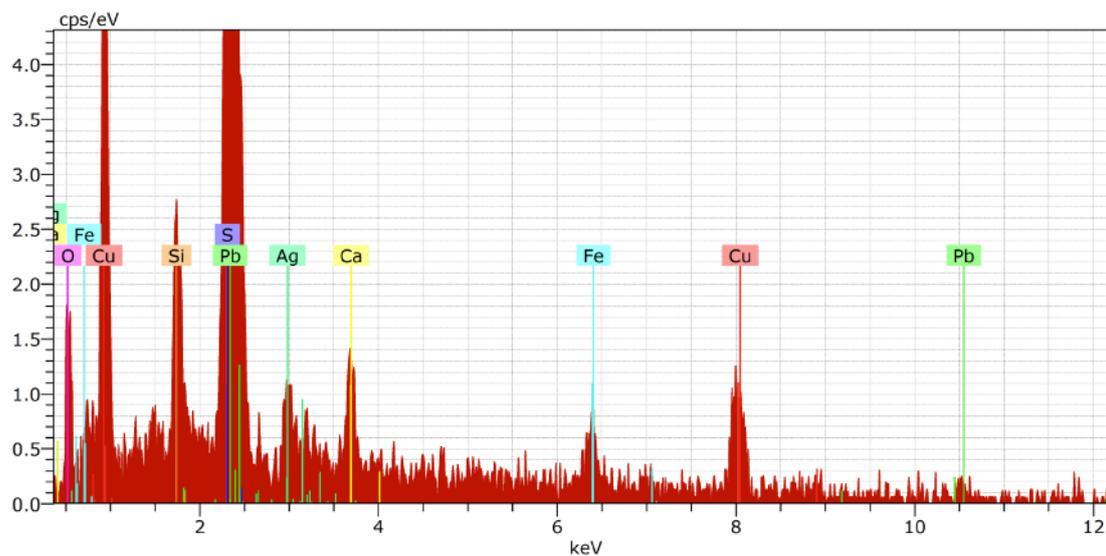
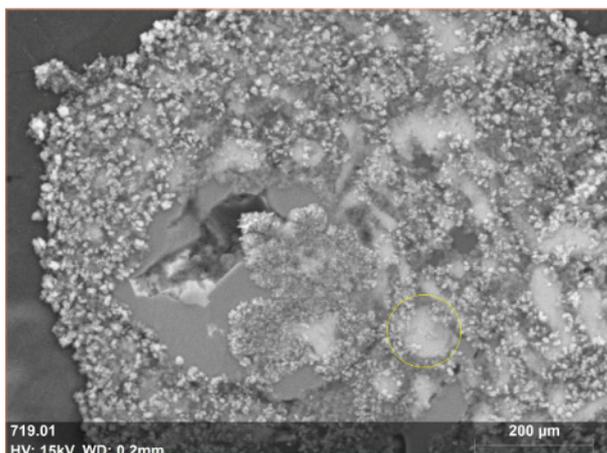


719.01 Fecha: 30/05/2023 04:32:09 p.m. Tamaño imagen: 480 x 360

ANEXO. 25 MAPEOS DE LOS ELEMENTOS PRESENTES EN UNA INCLUSIÓN DE ESCORIAS VÍTREAS.  
ANALIZADO CON MICROSCOPIO ELECTRÓNICO Y EDS.



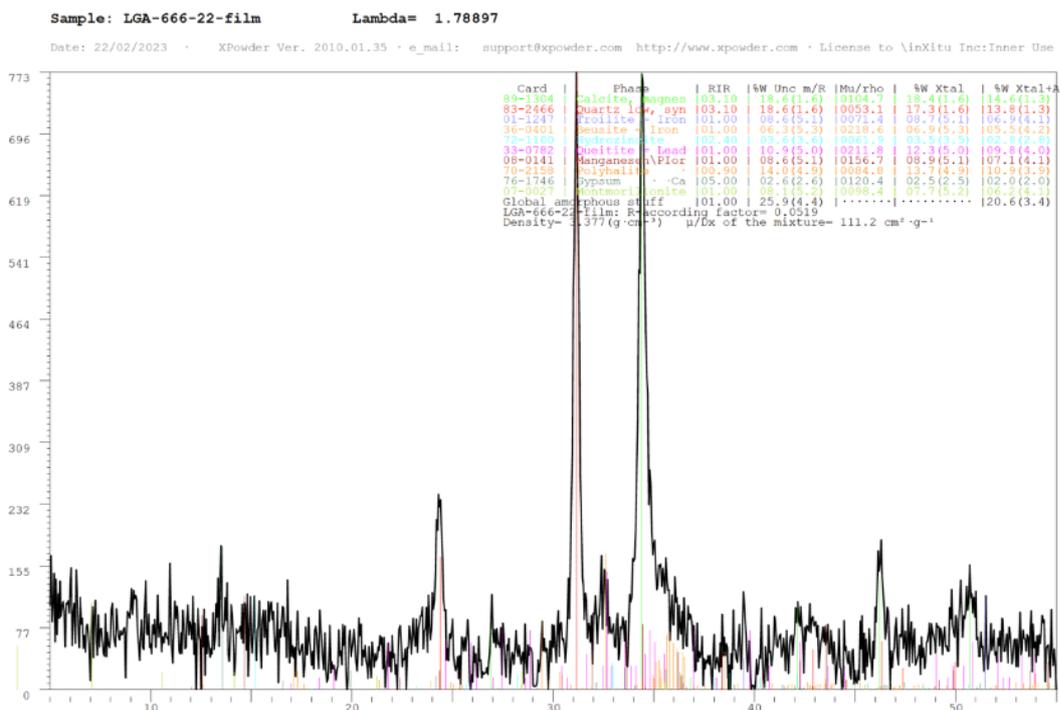
ANEXO. 26 ANÁLISIS CON EDS EN ESCORIAS PULIDAS. EL SITIO ANALIZADO SE MUESTRA CON UN CÍRCULO AMARILLO. ZONA DE ANÁLISIS QUE PRESENTÓ LAS CONCENTRACIONES MÁS ELEVADAS DE PLATA ASOCIADO A S Y A CU CON PRESENCIA DE FE Y PB.



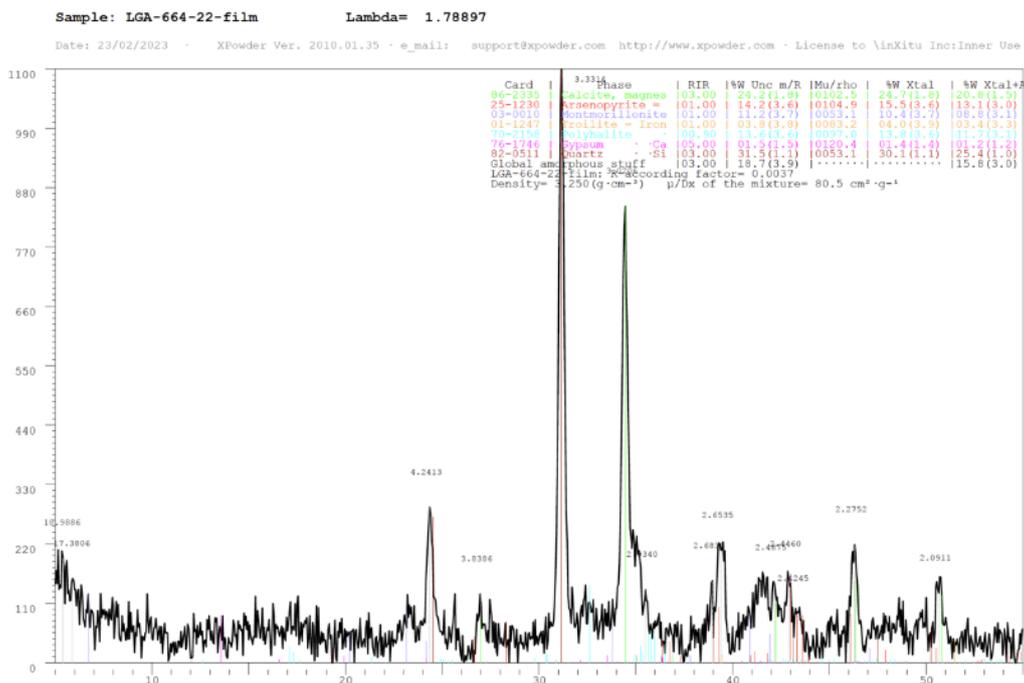
Spectrum: Point

Element	AN	Series	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]
Cobre	29	K-series	32.93	26.57
Plomo	82	M-series	27.86	6.90
Azufre	16	K-series	12.31	19.69
Hierro	26	K-series	8.79	8.07
Oxígeno	8	K-series	7.92	25.40
Calcio	20	K-series	5.74	7.34
Silicio	14	K-series	2.90	5.29
Plata	47	L-series	1.56	0.74
Total:			100.00	100.00

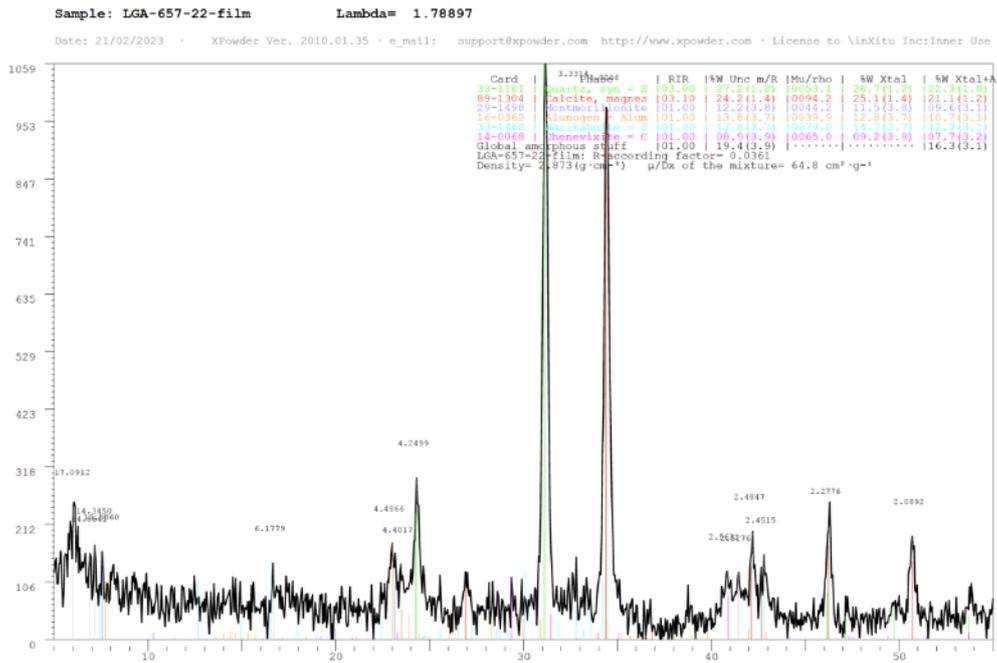
ANEXO. 27 DIFRACTOGRAMA DE MUESTRA 666 DE SUELOS CONTAMINADO DE MATEHUALA.



ANEXO. 28 DIFRACTOGRAMA DE MUESTRA 664 DE SUELO CONTAMINADO DE MATEHUALA.



ANEXO. 29 DIFRACTOGRAMA DE MUESTRA 657 DE SUELO CONTAMINADO DE MATEHUALA.



ANEXO. 30 DIFRACTOGRAMA DE MUESTRA DE SUELO 654 CONTAMINADO DE MATEHUALA.

