

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Parámetros generales

En las tablas 5-1 a y b, se muestran los resultados de pH y conductividad eléctrica. Para los jales, tanto oxidados como los visiblemente inalterados, los valores de pH varían entre 2.1 y 6.4; mientras que para las muestras de la mina varían entre 2.4 y 3.5. Los valores de conductividad eléctrica (mS/cm) varían entre 1.46 a 3.88 para los jales y entre 2.6 a 4.33 para las muestras de la mina subterránea.

Tabla 5.1a Valores de **pH** y conductividad eléctrica (**CE**) en muestras de jales

MUESTRA	CE	pH	OBSERVACIONES
	mS/cm		
JTZ1	1.78	5.3	Inalterados (gris)
JTZ2	1.71	5.1	inalterados (gris)
JTZ3	1.98	5	inalterados (gris)
JTZ4	1.46	5	inalterados (gris)
JTZ5	3.25	4	inalterados (gris)
JTZ6	1.82	5.1	inalterados (gris)
JTZ7	2.61	3	oxidados (café)
JTZ8	2.62	3	oxidados (café)
JTZ9	3.88	2.9	oxidados (café)
JTZ10	2.21	3.2	oxidados (café)
JTZ11	1.96	6.4	oxidados (café)
JTZ12	3.15	2.1	oxidados (café)
JTZ13	3.02	3	oxidados (café)

Tabla 5.1b Valores de pH y conductividad eléctrica en muestras de la mina

MUESTRA	CE	pH	OBSERVACIONES
	ms/cm		
T1B	2.88	2.7	oxidada (rojizo)
T2B	2.6	3.5	oxidada (amarillo)
T3B	3.33	3.3	oxidada (café)
T2M	4.33	2.4	oxidada (café)
T3M	2.8	3	oxidada (café)

Los resultados presentados en la Tablas 5.1 “a” y “b” indican que en las muestras de la mina y de los jales oxidados, de la presa inactiva de jales, los valores de pH son más bajos (mayor acidez) que en las muestras de los jales, visiblemente inalterados, de la presa activa.

Las muestras con valores de pH más ácidos presentan los mayores valores de CE (Fig. 5.1 a) y viceversa. El análisis estadístico de estos parámetros indica que el pH y CE se correlacionan de manera inversa con un coeficiente de correlación  $r = -0.7657$  (Fig. 5.1b) lo que indica que a menor pH mayor CE.

Los valores altos de CE, el color café-amarillo y los valores de pH ácidos en las muestras de la mina y de los jales oxidados, de la presa inactiva de jales, indican que estos materiales están intensamente oxidados y que durante este proceso se liberaron protones y se formaron sales solubles.

El hecho de que bajo las condiciones más ácidas se determinen los mayores valores de CE se debe probablemente a que en el medio ácido se propicia la disolución de minerales presentes en los residuos mineros. Considerando que la disolución de minerales implica su disociación en sus iones componentes, los cuales pasan a formar parte de los lixiviados, con el subsecuente aumento de la CE; por lo tanto éste parámetro podría ser utilizado como un indicador indirecto para valorar la calidad de los lixiviados de residuos mineros.

Es importante destacar que los jales grises de la presa activa de jales presentan valores de pH ligeramente ácidos y altos valores de CE, lo que parece indicar procesos de oxidación incipientes, pero que aún no han incidido en el cambio de coloración de estos residuos.

## **5.2 Potencial de generación de drenaje ácido**

En el caso de los jales oxidados y las muestras de la mina, donde los procesos de oxidación son intensos (coloración de las muestras café-amarillo-rojo) la determinación del pH es suficiente para valorar su potencial para la generación de drenaje ácido. En este tipo de



En los jales, visiblemente inalterados, de color gris de la presa activa de jales, los valores de pH varían entre 4 y 5.3 (Tabla 5.1 “b”), lo que indica condiciones de acidez moderada. Sin embargo, la determinación de los valores de pH en jales inalterados no es suficiente para valorar su potencial de generación de drenaje ácido en el futuro; ya que en estos jales el proceso de oxidación está en la etapa inicial; por lo que en este tipo de jales se llevó a cabo la prueba de balance ácido-base, de acuerdo a la metodología señalada en la Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2004, con el fin de pronosticar si se generará drenaje ácido, en el futuro, cuando estos jales se oxiden por la acción del agua y aire.

Los resultados de las pruebas de balance ácido-base se presentan en la Tabla 5.2. Los resultados de esta prueba permiten pronosticar que los jales de esta mina serán generadores de drenaje ácido en el futuro cuando se oxiden, ya que el potencial de neutralización “PN” (media=16.5Kg CaCO<sub>3</sub>/tonelada de jal) es muy inferior al potencial de acidez “PA” (media=584.105Kg CaCO<sub>3</sub>/tonelada de jal). La relación PN/PA varía entre 0.021 y 0.051.

Tabla 5.2 Potencial de generación de drenaje ácido

MUESTRA	CE	pH	PN	PA	PN/PA
	mS/cm		Kg CaCO <sub>3</sub> /ton	Kg CaCO <sub>3</sub> /ton	
JTZI	1.78	5.3	12.34	586.25	0.021
JTZ2	1.71	5.1	12.71	558.70	0.023
JTZ3	1.98	5	12.72	616.89	0.021
JTZ4	1.46	5	14.65	683.15	0.021
JTZ6	1.82	5.1	17.38	589.86	0.029
JTZ11	1.96	6.4	25.53	502.56	0.051

Nota: De acuerdo a los criterios establecidos en la Normatividad Ambiental de México los jales se clasifican como generadores de potencial de acidez cuando la relación PN/PA < 1.2 (NOM-141-SEMARNAT-2004).

## 5.3 Concentración total de elementos mayores y elementos potencialmente tóxicos

### 5.3.1 Elementos mayores

En la Tabla 5.3 se muestran las concentraciones totales de los siguientes elementos: silicio ( $\text{SiO}_2$ ), titanio ( $\text{TiO}_2$ ), aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), manganeso ( $\text{MnO}$ ), calcio ( $\text{CaO}$ ), magnesio ( $\text{MgO}$ ), potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ ), sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y azufre (S).

De manera general, se puede observar en la Tabla 5.3, que la composición química de las muestras del sitio de estudio está dominada por la presencia de Fe como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , (14.08 – 45.09 %) y azufre (10.64 – 22.84%). En proporción muy inferior destacan las concentraciones de Si como  $\text{SiO}_2$  (4.67 – 7.78%), Al como  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0.76-2.11%) Ca como  $\text{CaO}$  (0.26-2.61%), Na como  $\text{Na}_2\text{O}$  (0.05-1.31%) y K como  $\text{K}_2\text{O}$  (0.06-0.52%)

Las concentraciones de los elementos asociados a minerales con potencial neutralizador son muy bajas (Si, Al, Ca, K y Na) con relación a los elementos que puedan asociarse a los minerales con potencial para la generación de acidez (Fe y S).

En el caso más conservador si se asume que todo el Fe está asociado a la pirita (principal sulfuro metálico que al oxidarse genera drenaje ácido) y que todo el calcio está asociado a la calcita (principal mineral neutralizador), se puede inferir que la calcita presente es insuficiente para poder neutralizar el drenaje ácido que se genere. De manera gráfica se presenta en la Figura 5.2 el predominio de las concentraciones totales de Fe sobre las concentraciones de Ca.

El predominio en la composición química, de las muestras de estudio, de elementos asociados a minerales productores de acidez sobre los elementos (asociados a minerales consumidores de acidez, explica el hecho de que los jales de la presa inactiva y muestras de la mina sean, actualmente, generadores de drenaje ácido; y que las pruebas de pronósticos (prueba de balance ácido-base) indiquen que los jales de la presa activa serán generadores de drenaje ácido en el futuro.

Tabla 5.3 Concentración de los elementos mayores por Fluorescencia de Rayos X

CLAVE MAPA	MUESTRA		SiO <sub>2</sub>	TiO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	S
			%									
1	JTZ1	Jales	6.54	< LOD	0.99	40.59	0.08	0.83	0.33	0.13	0.11	19.90
2	JTZ2		7.49	< LOD	0.98	35.21	0.08	0.66	0.42	0.21	0.14	18.68
3	JTZ3		6.57	< LOD	0.88	41.78	0.08	0.80	0.38	0.09	0.10	20.71
4	JTZ4		6.76	< LOD	0.83	42.70	0.08	0.67	0.27	0.08	0.08	22.61
5	JTZ5		6.76	< LOD	1.05	42.52	0.08	0.48	0.26	0.70	0.17	18.26
6	JTZ6		7.14	< LOD	0.84	39.99	0.09	0.71	0.35	0.21	0.10	20.00
7	JTZ7		7.41	< LOD	0.84	44.71	ND	0.58	0.29	0.17	0.10	22.84
8	JTZ8		7.14	< LOD	0.76	45.09	0.05	0.53	0.28	0.31	0.07	22.01
9	JTZ9		7.78	< LOD	1.17	40.25	0.05	0.54	0.34	0.29	0.11	19.06
10	JTZ10		6.86	< LOD	1.01	40.35	ND	0.71	0.33	0.39	0.11	19.93
11	JTZ11		7.55	< LOD	1.06	40.72	ND	0.54	0.55	0.19	0.06	18.11
12	JTZ12		5.81	< LOD	0.88	38.28	ND	0.12	0.29	1.31	0.15	19.76
13	JTZ13		5.10	< LOD	1.98	42.96	ND	0.55	0.26	0.05	0.10	17.95
T-2M	T-2M	Mina	5.30	< LOD	1.96	40.24	ND	0.44	1.50	0.14	0.27	15.59
T-3M	T-3M		4.67	< LOD	1.76	16.26	0.04	0.53	2.61	0.21	0.43	10.64
T-1B	T-1BOTELLA		5.35	< LOD	1.65	14.08	0.06	0.44	1.89	0.26	0.52	10.67
T-2B	T-2BOTELLA		7.26	< LOD	2.11	31.66	ND	0.32	0.55	0.14	0.28	15.17
T-3B	T-3BOTELLA		5.92	< LOD	1.68	41.26	0.06	0.47	1.23	0.14	0.27	15.09
<b>Mínimo</b>			<b>4.67</b>	<b>&lt;LOD</b>	<b>0.76</b>	<b>14.08</b>	<b>0.04</b>	<b>0.12</b>	<b>0.26</b>	<b>0.05</b>	<b>0.06</b>	<b>10.64</b>
<b>Máximo</b>			<b>7.78</b>	<b>&lt;LOD</b>	<b>2.11</b>	<b>45.09</b>	<b>0.09</b>	<b>0.83</b>	<b>2.61</b>	<b>1.31</b>	<b>0.52</b>	<b>22.84</b>
<b>Promedio</b>			<b>6.52</b>	<b>&lt;LOD</b>	<b>1.25</b>	<b>37.70</b>	<b>0.07</b>	<b>0.55</b>	<b>0.67</b>	<b>0.28</b>	<b>0.18</b>	<b>18.17</b>

<LOD: Valor inferior al límite de detección de la técnica de análisis

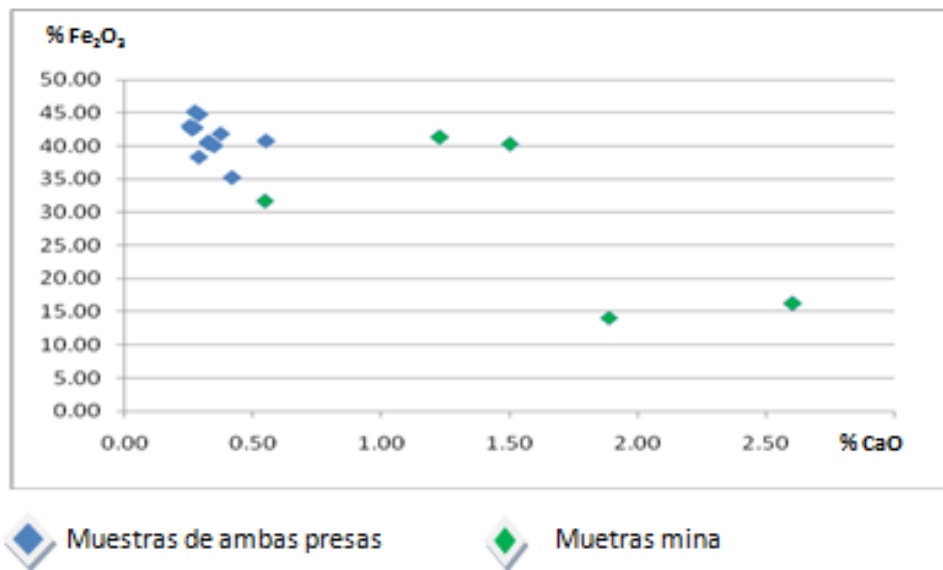


Figura.5.2 Concentración de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs CaO

### 5.3.2 Elementos potencialmente tóxicos

En la Tabla 5.4 se presentan los resultados de las concentraciones de los EPT en las muestras de los jales y de la mina de la zona de estudio.

#### A) Elementos potencialmente tóxicos regulados en la normatividad ambiental mexicana en materia de jales: Norma Oficial Mexicana NOM-141<sup>1</sup>

Las concentraciones totales de Cr y Hg son inferiores al límite de detección, lo que indica que en la zona de estudio los jales y las muestras de la mina se caracterizan por la ausencia de estos elementos. Además, estas muestras se caracterizan por las bajas concentraciones de Ba (No detectado - 601 mg/kg), Ag (No detectado - 62 mg/kg), y Se (No detectado - 31 mg/kg), que son incluso inferiores a los límites permisibles establecidos en la normatividad mexicana para suelos contaminados<sup>2</sup>, por lo que se puede afirmar que en la zona de estudio no hay una fuente de contaminación de estos EPT (Cr, Ba, Ag, Hg y Se).

Sin embargo, las concentraciones de As (315 - 8291 mg/kg), Cd (No detectado - 181 mg/kg) y Pb (446 - 3043 mg/kg) son relativamente altas y pueden representar un peligro y riesgo para el medio ambiente y salud humana. Cabe señalar que la actual NOM-141-SEMARNAT-2003, no considera límites permisibles respecto a la concentración total EPT esto debería ser considerado por las autoridades.

Las concentraciones de As, Cd y Pb son mayores a los valores de fondo máximo, reportados para la región donde se ubica la zona de estudio<sup>3</sup>. De manera general, en el caso del As, el valor de fondo se supera de 2 hasta 52 veces, para el plomo de 5 hasta 33 veces y para el cadmio de 2 a 14. Veces (Fig. 5.3).

---

<sup>1</sup> Los elementos normados son: As, Ba, Cd, Cr, Hg, Ag, Pb y Se

<sup>2</sup> Límite permisibles de EPT (mg/kg) indicados en la NOM-147- SEMARNAT-2004: As = 22, Ba = 2400, Be = 150, Cd = 37, Cr = 280, Hg = 23, Ni = 1600, Ag = 390, Pb = 400, Se = 390, V = 78

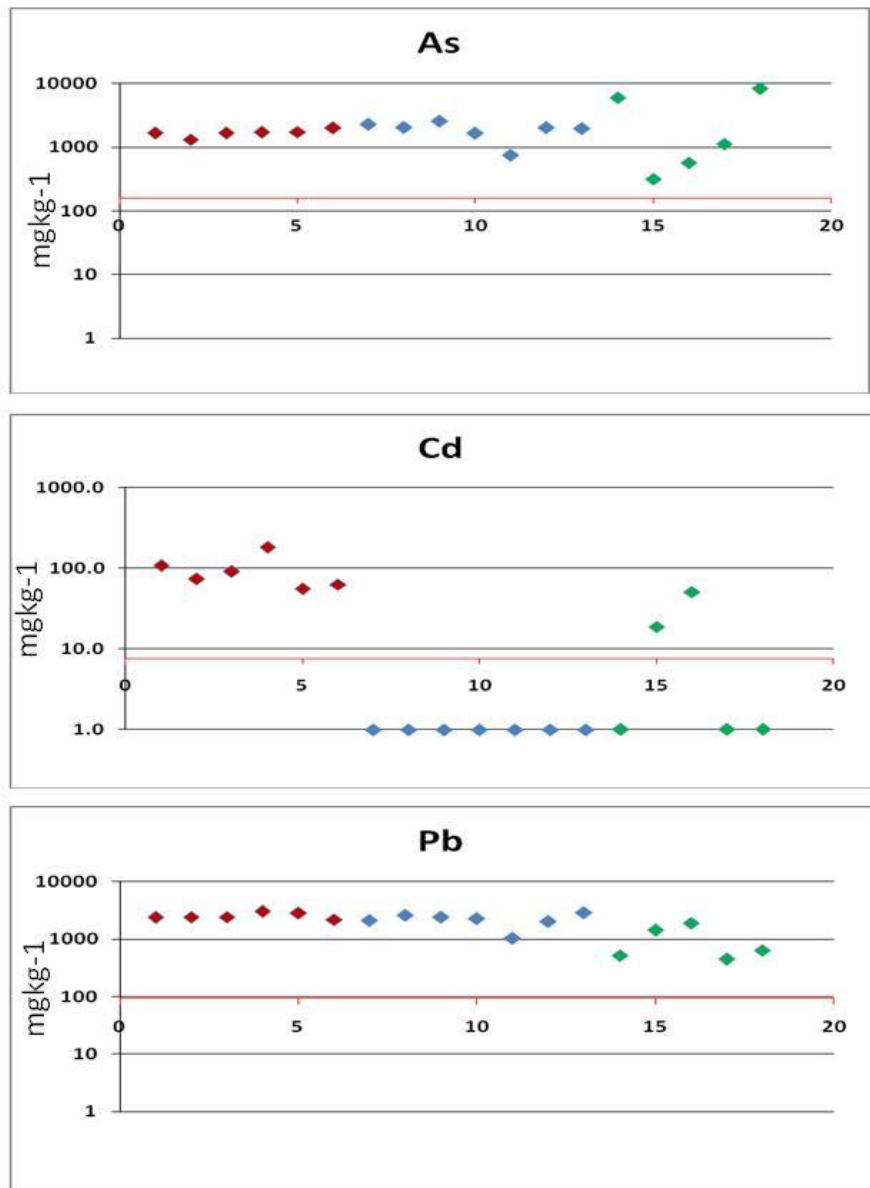
<sup>3</sup> Valores de fondo (mg/kg) reportados; As = 161, Cd = 8 y Pb = 94. Fuente: SNIB-CONABIO Proyecto No. FBII293/GS00/08. México D.F

Tabla 5.4 Concentración total de Elementos Potencialmente Tóxicos

CLAVE			As	Ba	Cd	Cr	Hg	Ag	Pb	Se	Cu	Zn	Ni	Co	V
MAPA	MUESTRA		mg/kg												
1	JTZ1	Jales	1666	259.8	107.6	< LOD	< LOD	50.6	2378	< LOD	941	18577	< LOD	< LOD	< LOD
2	JTZ2		1318	173.6	73.9	< LOD	< LOD	38.2	2403	22.22	1075	13095	< LOD	< LOD	< LOD
3	JTZ3		1661	226.1	90.9	< LOD	< LOD	54.4	2420	< LOD	1065	15559	< LOD	< LOD	< LOD
4	JTZ4		1700	288	181	< LOD	< LOD	62.5	3043	< LOD	1268	32644	< LOD	< LOD	< LOD
5	JTZ5		1730	600.8	55.6	< LOD	< LOD	37	2830	28.41	996	8580	< LOD	< LOD	< LOD
6	JTZ6		2013	209.3	62.9	< LOD	< LOD	29.8	2170	19.22	927	12081	< LOD	< LOD	< LOD
7	JTZ7		2288	262.9	< LOD	< LOD	< LOD	27.8	2135	< LOD	182	2733	< LOD	< LOD	< LOD
8	JTZ8		2041	273.4	< LOD	< LOD	< LOD	35.3	2624	< LOD	198	1815	242.2	< LOD	< LOD
9	JTZ9		2562	207.5	< LOD	< LOD	< LOD	26.1	2443	< LOD	283	1581	< LOD	< LOD	< LOD
10	JTZ10		1659	150.6	< LOD	< LOD	< LOD	27	2301	22.51	214	1382	< LOD	< LOD	< LOD
11	JT11		746	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	1048	< LOD	154	4359	< LOD	< LOD	< LOD
12	JTZ12		2025	173.7	< LOD	< LOD	< LOD	23.4	2053	16.39	130	1319	< LOD	< LOD	< LOD
13	JTZ13		1964	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	30.5	2913	30.71	192	2026	< LOD	< LOD	< LOD
T-2M	T-2M	Mina	5991	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	524	< LOD	83	1565	150.5	< LOD	< LOD
T-3M	T-3M		315	144.5	18.7	< LOD	< LOD	21.4	1434	< LOD	363	5600	< LOD	< LOD	< LOD
T-1B	T-1BOTELLA		573	233.8	51.1	< LOD	< LOD	32.6	1897	< LOD	535	8452	< LOD	< LOD	< LOD
T-2B	T-2BOTELLA		1126	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	446	< LOD	102	1070	292	< LOD	< LOD
T-3B	T-3BOTELLA		8291	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	635	< LOD	164	3863	< LOD	< LOD	< LOD
<b>Mínimo</b>			<b>315</b>	<b>&lt; LOD</b>	<b>&lt; LOD</b>	<b>&lt; LOD</b>	<b>&lt; LOD</b>	<b>&lt; LOD</b>	<b>446</b>	<b>&lt; LOD</b>	<b>83</b>	<b>1070</b>	<b>&lt; LOD</b>	<b>&lt; LOD</b>	<b>&lt; LOD</b>
<b>Máximo</b>			<b>8291</b>	<b>601</b>	<b>181</b>	<b>&lt; LOD</b>	<b>&lt; LOD</b>	<b>62</b>	<b>3043</b>	<b>31</b>	<b>1268</b>	<b>32644</b>	<b>292</b>	<b>&lt; LOD</b>	<b>&lt; LOD</b>
<b>Promedio</b>			<b>2204</b>	<b>246</b>	<b>80</b>	<b>&lt; LOD</b>	<b>&lt; LOD</b>	<b>35</b>	<b>1983</b>	<b>23</b>	<b>493</b>	<b>7572</b>	<b>228</b>	<b>&lt; LOD</b>	<b>&lt; LOD</b>

<LOD: Valor inferior al límite de detección de la técnica de análisis





Muestras

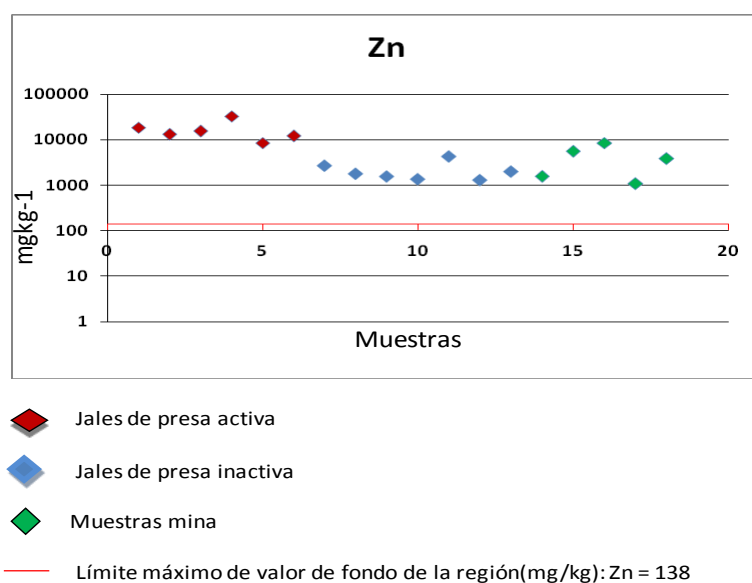
- ◆ Jales de presa activa
- ◆ Jales de presa inactiva
- ◆ Muestras mina
- Límite máximo de valor de fondo de la región(mg/kg): As= 161, Cd= 8, Pb= 94

Figuras 5.3. Concentración de As, Cd y Pb y valores de fondo reportados para la región: As= 161, Cd=8 y Pb=94

## B) Elementos potencialmente tóxicos No regulados en la normatividad ambiental mexicana en materia de jales: Norma Oficial Mexicana

Adicional a los elementos potencialmente tóxicos (EPT) regulados en NOM-141, se determinaron las concentraciones de otros EPT , como Ni y V. Los resultados indican que en la zona de estudio no hay problemas de contaminación por estos elementos potencialmente tóxicos ya que las concentraciones de Co, V y Ni (No detectado - 292 mg/kg) no fueron detectados por la técnica de análisis , son incluso inferiores a los límites permisibles establecidos en la normatividad mexicana para suelos contaminados<sup>4</sup>.

Las concentraciones de Cu (83-1268 mg/kg) y Zn (1070 – 32644 mg/kg) que no son regulados en la normatividad ambiental mexicana, son relativamente altas. Las concentraciones de Cu y Zn, son mayores a los valores de fondo máximo, reportados para la región donde se ubica la zona de estudio<sup>5</sup>. En el caso del Cu, el valor de fondo se supera de 1 hasta 13 veces, mientras que para el caso de Zn se supera de 8 hasta 236 veces (Fig. 5.4).



Figuras 5.4. Concentración de Zn y volares de fondo reportados para la región

<sup>4</sup> Límite permisibles de EPT (mg/kg) indicados en la NOM-147- SEMARNAT-2004: As = 22, Ba = 2400, Be = 150, Cd = 37, Cr = 280, Hg = 23, Ni = 1600, Ag = 390, Pb = 400, Se = 390, V = 78

<sup>5</sup> Valores de fondo (mg/kg) reportados; Cu = 100 y Zn = 138 . Fuente: SNIB-CONABIO Proyecto No. FBII293/GS00/08. México D.F

## 5.4 Concentración geodisponible (soluble) de componentes mayoritarios y elementos potencialmente tóxicos en los lixiviados de jales y muestras de la mina

### 5.4.1 Componentes mayoritarios: cationes y aniones de los lixiviados

La composición química de los lixiviados está dominada por la presencia del anión sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y el catión  $\text{Ca}^{2+}$ . Las mayores concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  se determinaron en los lixiviados de las muestras de mina, seguidas de los jales oxidados, Tabla 5.5. Las menores concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  corresponden a los lixiviados de los jales grises que muestran poca alteración visible.

Tabla 5.5 Concentración de componentes mayoritarios en lixiviados

CLAVE MAPA	MUESTRA		Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
			mg/L					
1	JTZ1	Jales inalterados	0.409	0.368	150.2	13.4	0.5	572
2	JTZ2		0.306	0.313	112.4	11.4	0.3	400
3	JTZ3		7.426	0.930	75.5	13.3	1.5	485
4	JTZ4		0.414	0.285	65.6	6.7	0.3	372
5	JTZ5		12.303	0.875	345.3	77.3	0.3	1470
6	JTZ6		2.163	0.378	155.6	18.3	0.7	564
7	JTZ7	Jales oxidados	2.135	0.000	279.7	4.7	0.8	954
8	JTZ8		0.748	0.000	257.2	2.1	0.3	953
9	JTZ9		0.334	0.000	196.5	7.4	0.5	1864
10	JTZ10		0.183	0.000	170.6	1.1	0.3	899
11	JT11		1.778	0.516	409.1	0.7	0.7	1014
12	JTZ12		1.016	<LOD	242.5	12.0	0.9	1219
13	JTZ13		0.677	<LOD	262.4	7.1	0.6	1096
T1B	T1B	Mina	2.789	<LOD	414.8	2.9	2.2	1627
T2B	T2B		0.466	<LOD	971.9	104.4	0.0	1980
T3B	T3B		6.443	<LOD	553.7	80.0	2.7	1970
T2M	T2M		1.133	<LOD	565.0	14.6	3.4	1892
T3M	T3M		1.133	<LOD	598.2	34.5	2.9	1683

<LOD: Valor inferior al límite de detección de la técnica de análisis

El análisis estadístico de estos datos indica que la mayor correlación se determinó entre  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  con coeficientes de correlación “r” = 0.8 (Tabla 5.6) lo que indica que la presencia de estos iones podría deberse a la disolución del yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) que es uno de los minerales secundarios más importantes que ocurren como producto de las reacciones de oxidación de la pirita ( $\text{FeS}_2$ ) y neutralización por la disolución de la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) en los residuos mineros, a través de la siguiente reacción química:

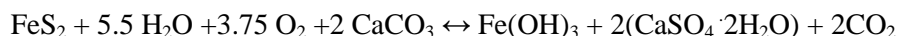


Tabla 5.6 Matriz de correlación entre los componentes mayoritarios y los valores de pH y CE en los lixiviados de la zona de estudio

	$\text{Na}_+$	$\text{K}_+$	$\text{Ca}_{2+}$	$\text{Mg}_{2+}$	Cl	$\text{SO}_4^{2-}$	CE	pH
$\text{Na}_+$	1							
$\text{K}_+$	-0.1	1						
$\text{Ca}_{2+}$	0.0	0.7	1					
$\text{Mg}_{2+}$	0.5	0.4	0.7	1				
Cl	0.1	0.6	0.4	0.1	1			
$\text{SO}_4^{2-}$	0.1	0.7	0.8	0.5	0.5	1		
CE	0.2	0.5	0.4	0.2	0.5	0.8	1	
pH	0.1	-0.6	-0.3	-0.1	-0.4	-0.6	-0.8	1

Por otro lado, la buena correlación entre los valores de  $\text{SO}_4^{2-}$  y CE ( $r = 0.8$ ) indica que a mayores valores de CE, mayores valores de  $\text{SO}_4^{2-}$  (Fig. 5.5), lo que indica que la concentración de este anión es la causa de la CE, lo que a su vez demuestra que los procesos de oxidación-neutralización, que ocurren en los residuos mineros de estudio, van acompañados de la liberación de  $\text{SO}_4^{2-}$ , por lo que corroboramos la afirmación hecha con anterioridad acerca de que la CE es un parámetro que podría ser utilizado como un indicador indirecto para valorar la calidad de los lixiviados de residuos mineros.

También es importante notar que las mayores concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  se determinaron en los lixiviados más ácidos (Fig. 5.6).

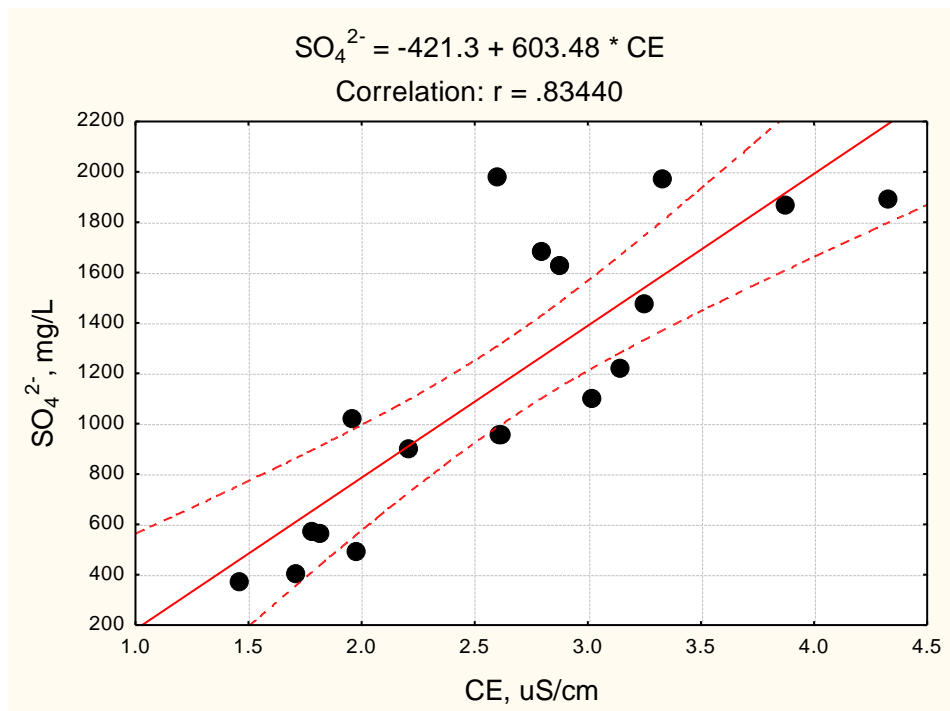


Figura 5.5 Correlación entre  $SO_4^{2-}$  y CE

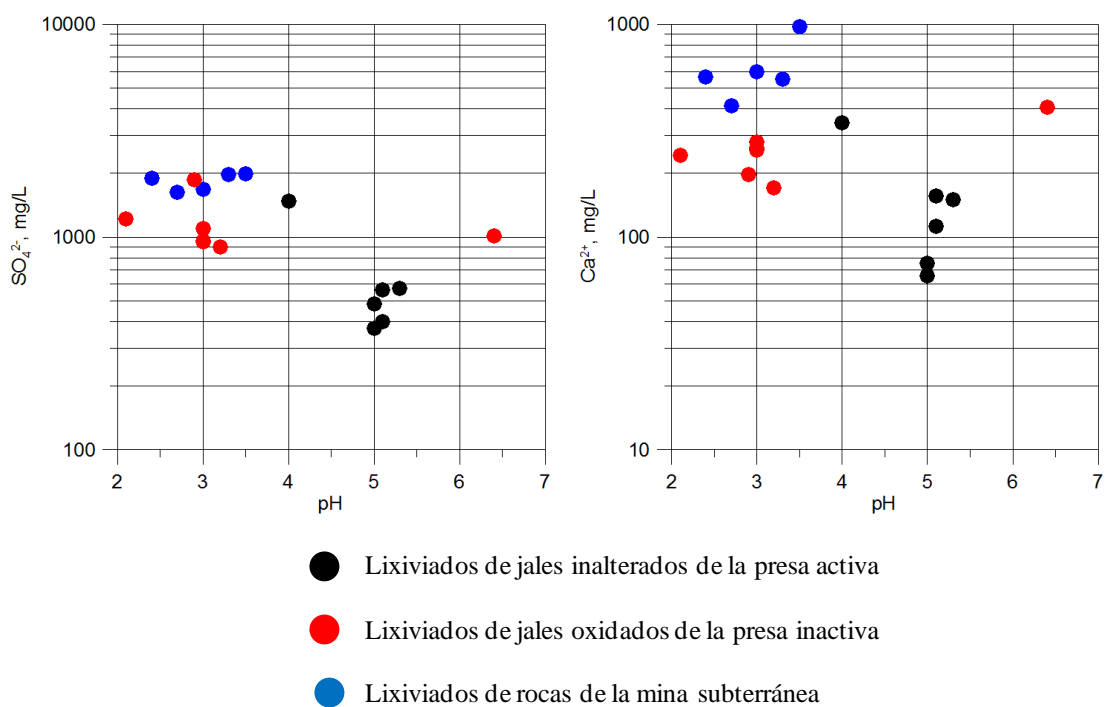


Figura 5.6.- Comportamiento de las concentraciones de  $Ca^{2+}$  y  $SO_4^{2-}$  en función del pH de los lixiviados en los jales y muestras de mina

#### **5.4.2 Elementos potencialmente tóxicos en lixiviados**

Con el objetivo de valorar la peligrosidad, por toxicidad, de los jales y muestras de la mina del sitio de estudio, se realizó la prueba de extracción señalada en la Norma Oficial Mexicana NOM – 141 – SEMARNAT – 2003. Los resultados se muestran en la Tabla 5.7 y 5.8.

##### **A) Elementos potencialmente tóxicos regulados en la normatividad ambiental mexicana en materia de jales NOM – 141 – SEMARNAT – 2003**

Los resultados obtenidos indican que las concentraciones geodisponibles (solubles) de los EPT regulados en la NOM – 141 – SEMARNT – 2003, son inferiores a los límites permisibles en dicha norma; por lo cual se concluye que estos materiales se pueden clasificar como NO PELIGROSOS por su toxicidad debido a que no contienen elementos potencialmente tóxicos geodisponibles (solubles) en concentraciones superiores a las señaladas en dicha norma

A pesar de las altas concentraciones totales de arsénico (As), cadmio (Cd) y plomo (Pb) (ver Tabla 5.4 de la sección 5.3.2), la concentraciones geodisponibles o solubles son relativamente bajas. En el caso del Cd, las concentraciones geodisponibles son del mismo orden tanto en el medio ácido como el neutro. Sin embargo, en el caso del As y Pb se puede observar (Fig. 5.7) que a valores ácidos de pH, se determinaron concentraciones muy bajas de estos EPT, lo que podría indicar que su retención en la fase sólida está relacionada con procesos de atenuación natural que disminuyen la peligrosidad de los jales y obras mineras de la zona de estudio.

##### **B) Elementos potencialmente tóxicos No regulados en la normatividad ambiental mexicana en materia a de jales: Norma Oficial Mexicana**

Para los elementos potencialmente tóxicos (EPT), cuya concentración total fue detectada en los jales y las muestras de la mina subterránea, se determinaron las concentraciones geodisponibles (solubles) (Tabla 5.8).

Los resultados indican que los lixiviados de los jales y muestras de mina de la zona de estudio se caracterizan por concentraciones relativamente altas de Si, Al, Fe, Mn, Cu y Zn que alcanzan valores máximos (mg/L) de 9.6, 40, 224, 9.8, 5.3 y 90, respectivamente.

Para el caso de Fe y Al, las mayores concentraciones de estos EPT corresponden a los lixiviados ácidos con  $\text{pH} < 4$ ; mientras que para el caso del Si, Zn, Cu y Mn, las mayores concentraciones geodisponibles corresponden a los lixiviados ácidos ( $\text{pH} < 4$ ) y medianamente ácidos ( $\text{pH} < 5.5$ ) (Fig. 5.8).

Tabla 5.7 Concentración geodisponible en los lixiviados de elementos potencialmente tóxicos (EPT) regulados en la Normatividad Ambiental Mexicana (NOM-141) en los jales y muestras de mina

Clave Mapa	As	Ba	Cd	Cr	Hg	Ag	Pb	Se
	mg/L							
1	0.0042	0.0181	0.242	<LOD	<LOD	<LOD	1.99	0.0062
2	0.0067	0.0173	0.172	<LOD	<LOD	<LOD	2.68	0.0075
3	0.0043	0.0137	0.232	<LOD	<LOD	<LOD	2.45	0.0093
4	0.006	0.0131	0.265	<LOD	<LOD	<LOD	2.91	0.0151
5	0.0135	0.0023	0.588	0.0024	<LOD	<LOD	2.05	0.0178
6	0.0062	0.0195	0.199	<LOD	<LOD	<LOD	1.15	0.0086
7	0.198	0.0103	0.0461	0.0665	<LOD	<LOD	0.85	0.0084
8	0.11	0.0069	0.0582	0.0261	<LOD	<LOD	2.35	0.0103
9	0.0746	0.0148	0.273	0.0486	<LOD	<LOD	0.64	0.0097
10	0.0039	0.0029	0.0365	0.0042	<LOD	<LOD	0.0043	0.0202
11	0.0256	0.0357	0.0001	<LOD	<LOD	<LOD	0.0007	0.0191
12	0.015	0.0105	0.08	0.0373	<LOD	<LOD	1.5	0.004
13	0.0069	0.0074	0.067	0.0234	<LOD	<LOD	2.32	0.0397
T2M	0.163	0.0076	0.0564	0.0011	<LOD	<LOD	0.0118	0.0022
T3M	0.0162	0.0071	0.0879	BLD	<LOD	<LOD	0.0032	0.0033
T1B	0.0501	0.0031	0.258	0.001	<LOD	<LOD	0.0172	0.0058
T2B	0.0029	0.001	0.0838	0.0031	<LOD	<LOD	0.0034	0.002
T3B	0.241	0.0046	0.053	<LOD	<LOD	<LOD	0.0035	0.0134
<b>Mínimo</b>	<b>0.0029</b>	<b>0.001</b>	<b>0.0001</b>	<b>&lt;LOD</b>	<b>&lt;LOD</b>	<b>&lt;LOD</b>	<b>0.0007</b>	<b>0.002</b>
<b>Máximo</b>	<b>0.241</b>	<b>0.0357</b>	<b>0.588</b>	<b>0.0665</b>	<b>&lt;LOD</b>	<b>&lt;LOD</b>	<b>2.91</b>	<b>0.0397</b>
<b>Límite permisible NOM-141-SEMARNAT-2004</b>								
	<b>5.0</b>	<b>100.0</b>	<b>1.0</b>	<b>5.0</b>	<b>0.2</b>	<b>5.0</b>	<b>5.0</b>	<b>1.0</b>

<LOD: Valor inferior al límite de detección de la técnica de análisis

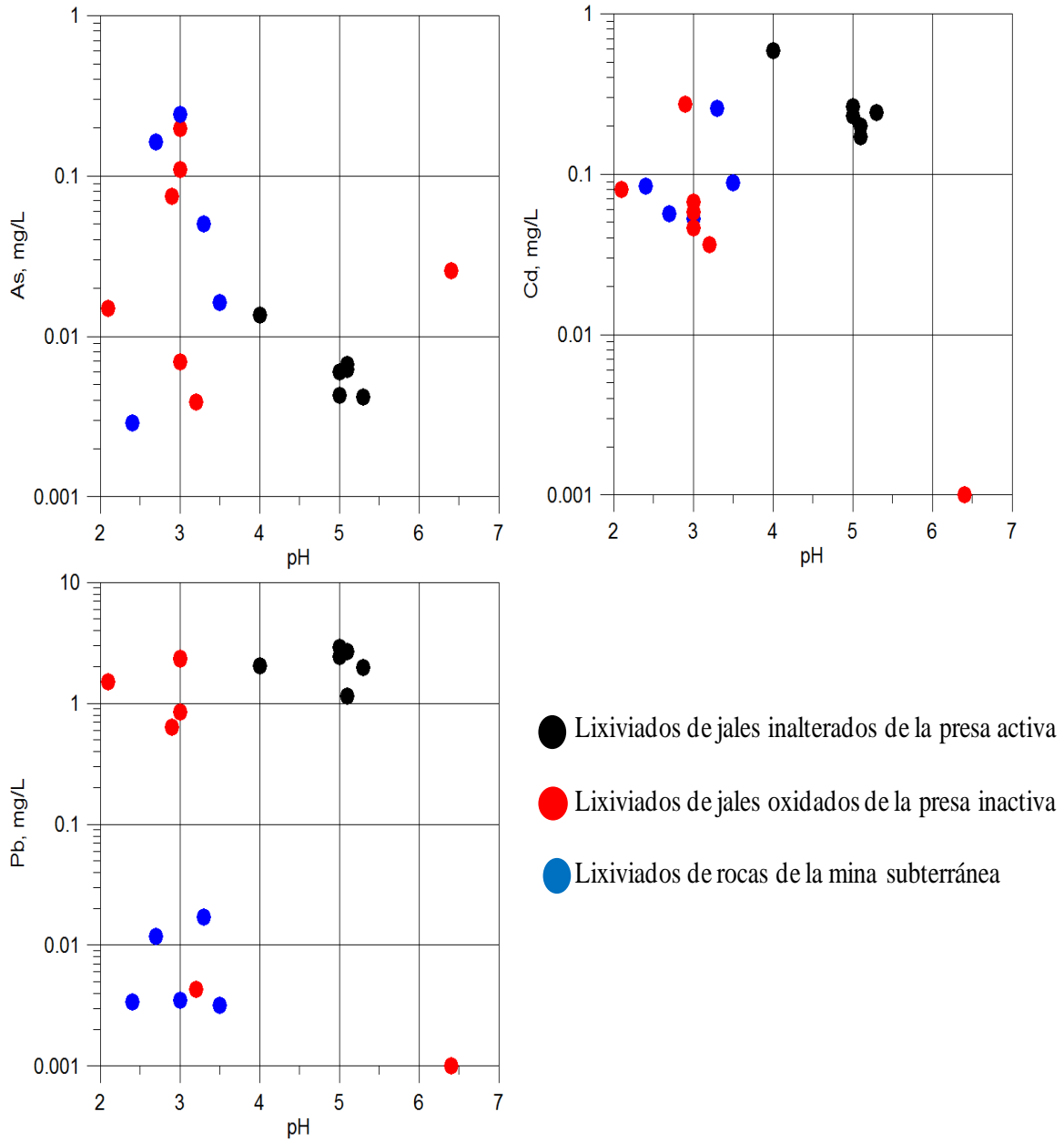


Figura 5.7 Comportamiento de las concentraciones geodisponibles (solubles) de As, Cd y Pb en función del pH de los lixiviados en los jales y muestras de mina



Tabla 5.8 Concentración geodisponible en los lixiviados de elementos potencialmente tóxicos (EPT) No regulados en la Normatividad Ambiental Mexicana (NOM-141), cuya concentración total fue detectada en los jales y muestras de mina

Clave Mapa	Si	Al	Fe	Mn	Cu	Zn
	mg/L					
1	1.10	0.03	0.05	3.24	0.23	29.70
2	0.80	0.01	0.04	2.08	0.19	19.60
3	1.00	<LOD	<LOD	2.36	0.11	24.70
4	0.90	0.01	0.04	2.47	0.15	32.60
5	1.60	0.56	4.41	9.80	1.58	77.70
6	1.00	0.00	0.05	3.05	0.13	26.50
7	0.60	6.60	41.50	0.33	1.48	6.39
8	0.70	14.90	54.00	0.35	1.30	6.77
9	1.40	40.00	224.00	0.81	5.33	37.60
10	0.60	9.00	18.90	0.28	0.38	3.62
11	6.80	0.01	<LOD	0.00	0.01	0.01
12	0.80	23.00	93.90	0.67	0.90	10.30
13	0.80	29.90	71.30	0.73	1.43	8.83
T2M	4.70	1.50	31.20	0.64	0.12	23.40
T3M	9.60	8.30	17.00	1.40	0.37	43.70
T1B	3.50	4.90	6.00	1.35	0.49	36.20
T2B	1.90	2.80	43.80	1.75	0.09	17.30
T3B	9.60	3.14	9.46	4.27	0.07	90.10
<b>Mínimo</b>	<b>0.60</b>	<b>&lt;LOD</b>	<b>&lt;LOD</b>	<b>0.00</b>	<b>0.01</b>	<b>0.01</b>
<b>Máximo</b>	<b>9.60</b>	<b>40.00</b>	<b>224.00</b>	<b>9.80</b>	<b>5.33</b>	<b>90.10</b>

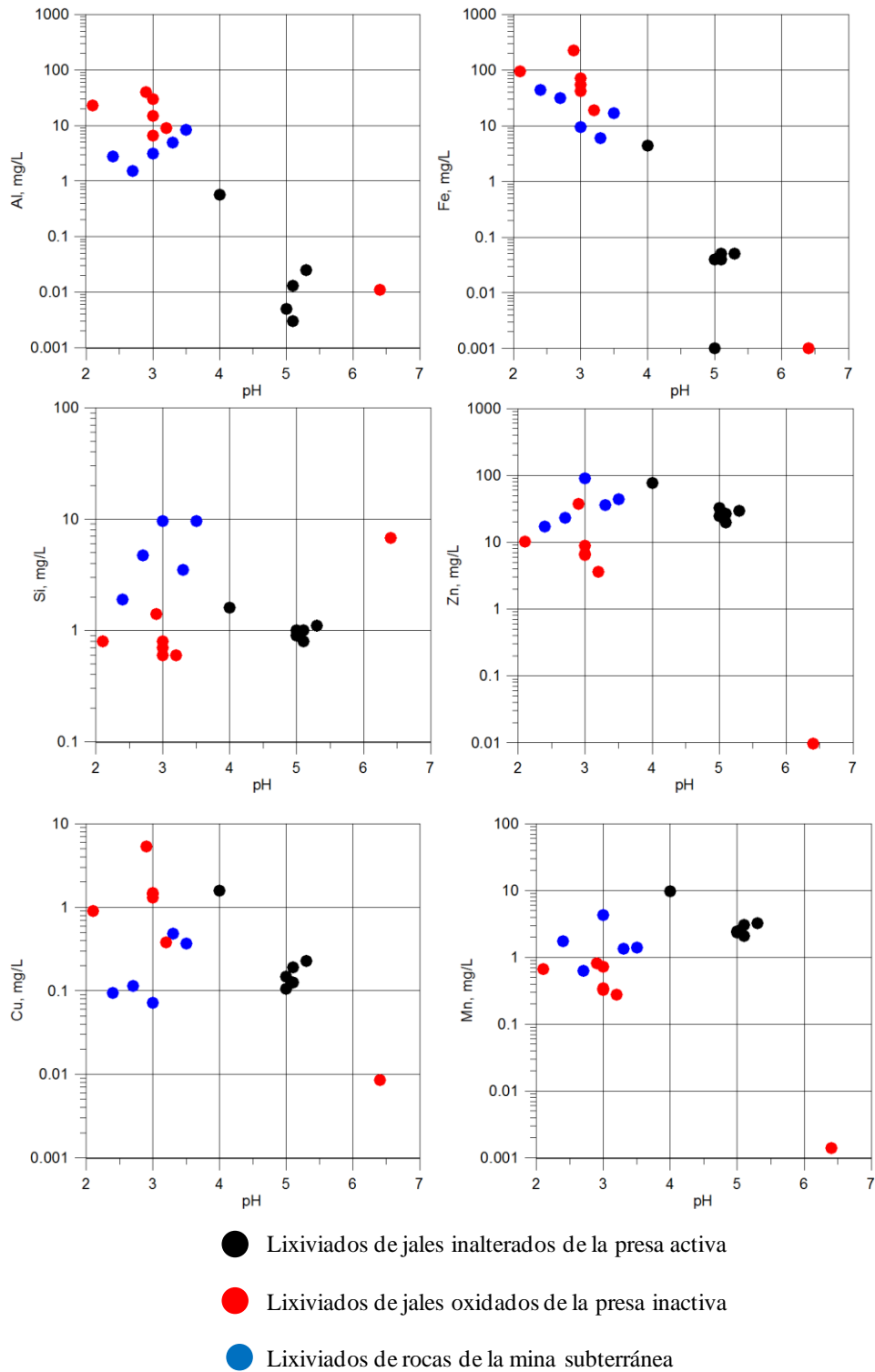


Figura 5.8 Comportamiento de las concentraciones geodisponibles (solubles) de Fe, Al, si, Zn, Cu y Mn en función del pH de los lixiviados en los jales y muestras de mina

## 5.5 Composición mineralógica

Los resultados de la composición mineralógica, determinada por DRX, se presentan en los cuadros 5.1 y 5.2.

En todas las muestras se identificaron los minerales primarios pirita ( $\text{FeS}_2$ ), cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), mica tipo moscovita:  $(\text{K,Ca,Na})(\text{Al,Mg,Fe})_2(\text{Si,Al})_4 \text{O}_{10}(\text{OH})_8$  y clorita  $(\text{Mg,Fe,Al})_6(\text{Si,Al})_4 \text{O}_{10}(\text{OH})_8$ . En dos muestras de jales de la presa activa se identificaron picos de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ).

Adicionalmente, en las muestras de jales oxidados de la presa inactiva y de las muestras de mina se identificaron los minerales secundarios yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y jarosita  $(\text{K,H}_3\text{O})\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})$ ; que son propios de ambientes mineros donde se genera drenaje ácido (Romero et al., 2007, 2009 y 2010). Adicionalmente en algunas muestras se identificaron picos de plagioclasas ( $\text{Ca}(\text{Si,Al})_2\text{Si}_2 \text{O}_8$ ).

Cuadro 5.1 Composición mineralógica de los jales de las presas activa (JTZ1-JTZ6) e inactiva (JTZ7-JTZ13)

Mineralogía de los jales	JTZ1	JTZ2	JTZ3	JTZ4	JTZ5	JTZ6	JTZ7	JTZ8	JTZ9	JTZ10	JTZ11	JTZ12	JTZ13
Pirita: FeS <sub>2</sub>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Cuarzo: SiO <sub>2</sub>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Clorita: (Mg,Fe,Al) <sub>6</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
Mica tipo moscovita: (k,Ca,Na)(Al,Mg,Fe) <sub>2</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
Calcita: CaCO <sub>3</sub>		X		X									
Yeso: CaSO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O			X		X	X	X						
Jarosita: (K,H <sub>3</sub> O)Fe <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>							X				X	X	
Plagioclasa :Ca(Si,Al) <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>											X		

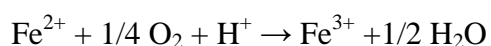
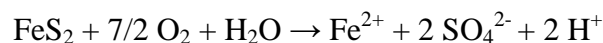
Cuadro 5.2 Composición mineralógica de las muestras mina

Mineralogía muestras mina	T2M	T3M	T1B	T2B	T3B
Pirita: FeS <sub>2</sub>	X	X	X	X	X
Cuarzo: SiO <sub>2</sub>	X	X	X	X	X
Clorita: (Mg,Fe,Al) <sub>6</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>	X	X	X		X
Mica tipo moscovita: (k,Ca,Na)(Al,Mg,Fe) <sub>2</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>	X	X	X	X	X
Yeso: CaSO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O	X	X		X	X
Jarosita: (K,H <sub>3</sub> O)Fe <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	X	X		X	X
Plagioclasa :(Ca (Si,Al) <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>		X			

## 5.6 Procesos geoquímicos identificados en los jales y muestras de mina de la zona de estudio

### a) Oxidación de pirita y generación de acidez

Los resultados de la difracción de rayos X indican que el principal sulfuro metálico en las muestras estudiadas es la pirita cuya oxidación derivó en la generación de drenaje ácido (liberación de protones  $H^+$ ),  $Fe^{2+}$  y  $Fe^{3+}$  y sulfatos ( $SO_4^{2-}$ ) de acuerdo a las siguientes reacciones:

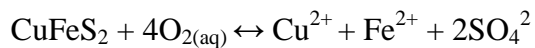
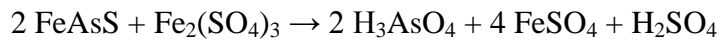
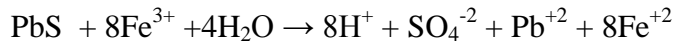
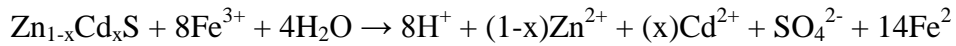


Lo anteriormente expuesto se pudo confirmar con los resultados en los lixiviados ácidos de la zona de estudio, donde se determinaron concentraciones de Fe geodisponibles (solubles) de hasta de 224 mg/L y para el  $SO_4^{2-}$  hasta de 1980 mg/L.

Aunque el análisis mineralógico sólo permitió la identificación elevada de pirita, las altas concentraciones de As, Zn y Pb permite inferir que en los jales y muestras de mina es posible la existencia de esfalerita ( $ZnS$ ), galena ( $PbS$ ), arsenopirita ( $FeAsS$ ) y calcopirita ( $FeCuS_2$ ) cuya oxidación y subsecuente disolución explicarían las concentraciones geodisponibles de Zn, Pb, As y Cu. La presencia de Cd en los lixiviados podría explicarse debido a la oxidación-disolución de la esfalerita, ya que ha sido reportada la presencia de Cd como impureza importante en la composición de la esfalerita (Romero et al., 2007), que incluso podría llegar a formar la esfalerita cádmica ( $Zn_{1-x}Cd_xS$ ).

Diferentes autores han reportado las reacciones de oxidación de los principales sulfuros metálicos que se encuentran en las zonas mineras (Faure 1980, Bain et al. 2000, Jennings et

al. 2000, Armienta et al. 2001, Costello 2003). A continuación se presentan las reacciones de oxidación de estos sulfuros metálicos:



## b) Neutralización

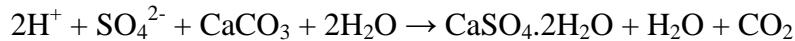
Bajo las condiciones ácidas, se propició la disolución o alteración de otros minerales presentes en los jales y muestras de mina, lo que derivó en la generación de lixiviados que se caracterizan por la presencia de algunos iones metálicos como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ , Si y  $\text{K}^+$ , con concentraciones máximas (mg/L) de hasta 972, 104, 40, 12.3, 9.8, 9.6 y 0.93, respectivamente.

Sin embargo, la disolución de los minerales con potencial de neutralización no fue suficiente para consumir toda la acidez generada por la oxidación de la pirita y a medida que estos minerales se agotaron o volvieron inaccesibles, el pH de los lixiviados acuosos de los jales y las muestras de mina disminuyó hasta los valores que se determinaron en este estudio con valores promedio de:  $\text{pH}_{\text{Jales de presa activa}} = 4.91$ ,  $\text{pH}_{\text{Jales de presa inactiva}} = 3.37$ ,  $\text{pH}_{\text{Muestras de mina}} = 2.98$ ).

Entre las principales reacciones de neutralización que pudieron haber ocurrido en el sitio de estudio y que explican las concentraciones geodisponibles de los cationes metálicos antes descritos están:

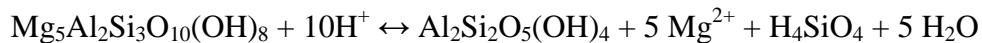
### b.1) Disolución de calcita ( $\text{CaCO}_3$ )

En algunas muestras se identificó calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) que se disolvió debido a la interacción con los lixiviados ácidos y ricos en sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), producto de la oxidación de la pirita, lo que propició la precipitación del mineral secundario denominado yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), que fue debidamente identificado por las técnica de DRX en este estudio.



#### b.2) Disolución de clorita $\text{Mg}_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$

La clorita es otro mineral que fue identificado por DRX en las muestras de estudio y su disolución en el medio ácido podría ser la explicación de las relativamente altas concentraciones de  $\text{Mg}^{2+}$  y Si (en forma de  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ).



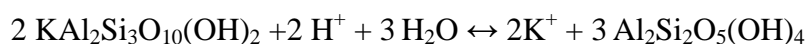
#### b.3) Disolución de plagioclasas $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$

La plagioclasa es otro mineral que fue identificado por DRX en las muestras de estudio y su disolución en el medio ácido podría ser la explicación de las relativamente altas concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Al}^{3+}$  y Si (en forma de  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ).



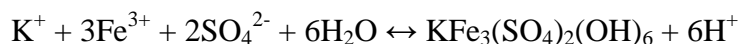
#### b.4) Disolución de moscovita $\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$

La moscovita es otro mineral que fue identificado por DRX y su disolución en medio ácido podría ser la explicación de las concentraciones de  $\text{K}^+$ .



Sin embargo, los iones  $\text{K}^+$  en presencia de  $\text{Fe}^{3+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  tienden a precipitar como jarosita, lo que podría explicar las relativamente bajas concentraciones de  $\text{K}^+$  en los lixiviados de la

zona de estudio (en comparación con los otros cationes) y la presencia de jarosita que fue debidamente identificada en este estudio por DRX.



### **C) Minerales secundarios y su relación con la movilidad del arsénico (As) y plomo (Pb)**

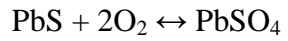
Los resultados obtenidos indican que las concentraciones geodisponibles (solubles) de los EPT, regulados en la NOM – 141 – SEMARNT – 2003, en los lixiviados ácidos de la zona de estudio son inferiores a los límites permisibles en dicha norma

A pesar de las altas concentraciones totales de arsénico (As) y plomo (Pb) las concentraciones geodisponibles o solubles son relativamente bajas y varían entre 0.0029 y 0.241 para el As y entre 0.007 y 2.91 mg/L para el Pb. En varias muestras de lixiviados se determinaron concentraciones muy bajas de estos EPT, lo que indica su retención en la fase sólida y que podría interpretarse como procesos de atenuación natural que disminuye la peligrosidad de los jales y obras mineras de la zona de estudio.

Un posible mecanismo que explique la atenuación natural del arsénico (As) podría ser su retención en jarosita, que fue debidamente identificada en la zona de estudio. Varios autores han reportado la retención de As en minerales del grupo de la jarosita debido al intercambio aniónico entre As (V) de los lixiviados y el  $\text{SO}_4^{2-}$  de la estructura cristalina de la jarosita ( $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ) (Foster, 1998; Paktunc and Dutrizac, 2003; Asta et al, 2009).

Un posible mecanismo que explique la atenuación del plomo (Pb) podría ser la precipitación de anglesita, que es un mineral poco soluble ( $K_{sp} = 10^{-7}$ ) en medios ácidos y medianamente ácidos (Romero et al., 2008). Aunque la anglesita no fue identificada en la zona de estudio su precipitación es muy común en sitios mineros, ya que bajo condiciones aeróbicas el producto de oxidación de la galena es la anglesita (Costello, 2003; romero et al., 2007)





Finalmente, un posible tercer mecanismo para explicar la atenuación natural de As y Pb podría ser la precipitación de la beudantita ((PbFe<sub>3</sub>[SO<sub>4</sub>][AsO<sub>4</sub>][OH]<sub>6</sub>),) que es estable en medio ácido. Aunque la beudantita no fue identificada en la zona de estudio su precipitación ha sido reportada como un mecanismo eficiente para el control de la movilidad del As y Pb en ambientes mineros bajo condiciones ácidas (Roussel et al., 2000; Romero et al., 2007 y 2010, Morales 2010).